

Tuukka Kontkanen

Tutkielma Thereminin salakuuntelulaitteen toiminnasta

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö

Työn valvoja:

Apulaisprofessori Ville Viikari

Tekijä: Tuukka Kontkanen		
Työn nimi: Tutkielma Thereminin salakuuntelulaitteen toiminnasta		
Päivämäärä: 11.5.2015	Kieli: suomi	Sivumäärä: 6+42
Radiotieteen- ja tekniikan laitos		
Professori: Radiotiede- ja tekniikka		Koodi: S-26
Valvoja: Apulaisprofessori Ville Viikari		
Ohjaaja: Apulaisprofessori Ville Viikari		
<p>Vuosina 1945–1952 Neuvostoliitto salakuunteli Yhdysvaltojen suurlähettilään työhuoneessa käytyjä keskusteluja Léon Thereminin suunnitteleman laitteen avulla. Puiheen seinätauluun kätetyn salakuuntelulaitteen toiminta perustui passiivisesti moduloituun takaisinsirontaan. Se oli ensimmäinen ilman virtalähdettä toiminut salakuuntelulaite ja rakenteeltaan hyvin yksinkertainen koostuen vain kahdesta osasta: äänenpaineen vaihteluun resonanssitaajuudellaan reagoivasta onteloresonaattorista ja siihen kytketystä antennilangasta. Suurlähetystön ulkopuolelta lähetinantennin avulla kuunneltavaan huoneeseen kohdistettu signaali heijastui salakuuntelulaitteesta moduloituna takaisin rakennuksen ulkopuolelle, jossa se vastaanotettiin ja demoduloitiin kaiuttimiin puheeksi. Tässä työssä on tutkittu laitteen mahdollisia toimintaperiaatteita simuloinein ja sähkömagneettisten aaltojen teoriaan perustuen; lisäksi on rakennettu alkuperäistä mukaileva kopio oletettuun toimintaperiaatteeseen perustuen ja mitattu laboratoriossa kopiolaitteen tuottamaa moduloitua takaisinsirontaa vasteena eritaajuisiin äänisignaaleihin. Mittaustulokset vahvistavat oletetun toimintaperiaatteen mahdolliseksi.</p>		
Avainsanat: moduloitu takaisinsironta, onteloresonaattori ja salakuuntelu.		

Author: Tuukka Kontkanen		
Title: Study of Theremin's bug and it's principle of operation		
Date: 11.5.2015	Language: Finnish	Number of pages: 6+42
Department of Radio Science and Engineering		
Professorship: Radio Science and Engineering		Code: S-26
Supervisor: Ville Viikari		
Advisor: Assistant Professor Ville Viikari		
<p>In 1945–1952 Soviet Union used a bug invented by Léon Theremin to eavesdrop conversations in the residence of the ambassador of the United States of America. The bug was hidden in a carved relief of the Great Seal, and its operation was based on modulated back-scattering. It was the first bug to operate without direct power source and it was very simple in its structure containing only two parts: a cylindrical cavity resonator and an antenna rod. The resonance frequency of the cylindrical cavity varied according to the speech. Outside the embassy, a sinusoidal signal was transmitted towards the bug. The speech modulated the back-scattered signal which was received outside the residence. Finally, the modulated signal could be demodulated to a loudspeaker. In this thesis, the possible operating principles of the bug were examined based on simulations and the theory of electromagnetic waves. Also, a copy of Theremin's device was built based on an assumed principle of operation. The modulated back-scattering from the copy was measured in a laboratory. The results confirm that it is possible that the bug operated as assumed in this thesis.</p>		
Keywords: modulated back-scattering, cylindrical cavity resonator, eavesdropping.		

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Abstract	iii
Sisällysluettelo	iv
Symbolit ja lyhenteet.....	v
1. Johdanto	1
2. Salakuuntelulaitteen toiminnan kuvauksessa tarvittavia käsitteitä	3
2.1 Antennien peruskäsitteitä ja sijaiskytkentä	3
2.2 Sirontailmiö ja kohteen tutkapoikkipinta-ala	5
2.3 Impedanssilla kuormitetun antennin sironta ja tutkapoikkipinta-ala	7
2.4 Amplitudi- ja vaihemoduloitu kantoaalto	8
2.5 Radioyhteys	9
2.6 Tyypillisen kondensaattorimikrofonin rakenne ja puheen äänenpaine	10
2.7 Onteloresonaattorin toiminta ja sijaiskytkentä	11
3. Alkuperäisen laitteen rakenne ja toiminta	14
3.1 Laitteen osat ja mitoitus	14
3.2 Oletettu toimintaperiaate kvalitatiivisesti	15
3.3 Oletettu toimintaperiaate kvalitatiivisesti	16
3.4 Sijaiskytkentään perustuva malli	17
3.5 Esimerkkilaskelma laitteen toiminnasta alkuperäisessä paikassa.....	17
4. Laitteen toiminnan tarkastelu simuloinnein ja laskutoimituksin	20
4.1 Kenttien ja virtojen jakautuminen rakenteessa	22
4.2 Mahdollisia keinoja kasvattaa toteutunutta modulaatiota	24
5. Laitteen rakentaminen ja mittausjärjestelyn kuvaus	25
5.1 Valmiin laitteen epäideaalisuudet	31
5.2 Modulaatiotehon mittaus	32
5.3 Toimintapisteen karkea etsintä S_{11} :n avulla	33
5.4 Tutkapoikkipinta-alan mittaus S_{11} :n avulla	33
6. Mittaustulokset	35
6.1 Toimintapisteen etsintä summataajuden avulla	35
6.2 Summataajuudella esiintyvän tehon riippuvuus moduloivasta äänitaajuudesta....	36
6.3 Tutkapoikkipinta-alan mittaus S_{11} :n avulla.....	38
7. Johtopäätökset.....	40
Lähteet	41

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

A	pinta-ala (m^2)
B	kaistanleveys (Hz)
c_0	valon tai äänen nopeus (m/s)
C	kapasitanssi (F)
d	ilmaväli (mm)
E	sähkökentän voimakkuus (V/m)
f	taajuus (Hz)
\mathbf{h}	tehollinen pituusvektori
I	sähkövirta (A)
k	Boltzmannin vakio (J/K)
k_0	etenemiskerroin (1/m)
L	induktanssi (H); antennilangan pituus (m)
p	äänenpaine (Pa)
P	teho (W)
Q	varaus (C); hyvyysluku
r	etäisyys (m)
R	resistanssi (Ω), etäisyys (m)
S	tehotiheys (W/m^2)
t	aika (s)
T	termodynaaminen lämpötila (K)
U	jännite (V)
W	resonaattorin sisältämä energia (J)
X	reaktanssi (Ω)
Z	impedanssi (Ω)
Δ	erotus
β	vaihemodulaatiokerroin (rad)
ε	permittiivisyys (F/m)
ε_r	suhteellinen permittiivisyys

ε_0	tyhjiön permittiivisyys (F/m)
δ	tunkeutumisvyvyys (m)
η_0	aaltoimpedanssi tyhjiössä (Ω)
η_{rad}	säteilyhyötysuhde
θ_{3dB}	keilanleveys (deg)
λ	aallonpituus (m)
μ	amplitudimodulaatiokerroin
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti (H/m)
ρ	heijastuskerroin; tiheys (kg/m^3)
σ	tutkapaikkipinta-ala (m^2); johtavuus (S/m)
ω	kulmataajuus (rad/s)
Ω	avaruuskulma (sr)

Lyhenteet

CST MWS	Simulointiohjelmistovalmistaja Computer Simulation Technologyn 3D simulaatio-ohjelmisto
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PEC	ideaalinen johde (engl. perfect electric conductor)
RAD	Radiotieteen- ja tekniikan laitos
VNA	vektoriipiirianalysointilaitteisto (engl. vector network analyser)

1. Johdanto

Vuonna 1945 Neuvostoliittolainen partiolaistoimikunta luovutti Yhdysvaltain suurlähettiläälle koristellun seinätaulun kiitokseksi toisen maailmansodan taistelutoveruudesta. Hyväntahdon eleeksi tulkittu lahja sijoitettiin työhuoneen seinälle suurlähettilään residenssissä Spaso Housessa. Seinätauluun oli kaiverrettu puusta Yhdysvaltain vaakunan etupuoli. Neuvostoliittolainen insinööri Léon Theremin (1896–1993) oli kehittänyt laitteen, joka seinätaulun sisään piilotettuna mahdollisti lähetystössä käytyjen keskustelujen salakuuntelun. Kesti seitsemän vuotta ennen kuin laitteen olemassaolo paljastui ja sen toimintaperiaatteesta päästiin lännessä selville. Osoittautui, että muista silloisista salakuuntelulaitteista poiketen Thereminin kojeen ei tarvinnut olla kytkettynä virtalähteeseen: laite oli passiivinen ja perustui sähkömagneettisen aallon moduloituun takaisinsirontaan. Toimintaperiaatteen selvitystyöhön osallistui tutkijoita niin CIA:sta kuin Iso-Britannian MI5:stäkin, minkä jälkeen oli luonnollista, että länsivallat kopioivat Thereminin kojeen toimintaperiaatteen omiin vastaaviin laitteisiinsa. Leon Thereminin laitetta pidetäänkin maailman ensimmäisenä mikroaalloilla etäluettavana anturina ja se loi pohjan nykyisin käytössä olevalle radiotaajuiselle tunnistustekniikalle [1],[2].

Koska 70 vuotta sitten ei ollut olemassa sähkömagneettisten kenttien simulointiohjelmistoja, oli laitteen rakentamisen taustalla varmasti ymmärryksen ohella yritystä ja erehdystä. Nykyään simulointiohjelmit helpottavat vastaavan laitteen mitoittamista, mutta ymmärrys resonanssi-ilmiöstä ja radiotaajuisen aaltojen sironnasta on edelleen olennaista. Tässä työssä on pyritty selvittämään salakuuntelulaitteen toimintaperiaate kvalitatiivisesti. Simuloinnein on etsitty mahdollisesti toimiva malli, jonka perusteella on rakennettu kopio salakuuntelulaitteesta. Lopuksi valmiin laitteen toimintaa on testattu koulun laboratoriossa, kaiuttomassa huoneessa.

Thereminin salakuuntelulaite oli transponderi eli laite, joka vastaa tutkasignaaliin moduloidulla heijasteella. Tutkien ja transpondereiden toiminta perustuu sähkömagneettisten aaltojen sirontaan. Materia vuorovaikuttaa tulevan aallon kentän kanssa siten, että osa tehosta ohjautuu alkuperäisestä poikkeavaan suuntaan. Näin on mahdollista saada hyvinkin monipuolisesti tietoa etäällä sijaitsevan kappaleen ominaisuuksista, kuten etäisyydestä, pyörimisnopeudesta, sijainnista ja kemiallisesta koostumuksesta. Sovelluksesta riippuen voidaan mitata tutkittavan kappaleen aiheuttamaa taajuuden, amplitudin, vaiheen ja polarisaation muutosta. Lisäksi on mahdollista mitata esimerkiksi sähkömagneettisen pulssin lähtöajan ja kaiun saapumisajan erotusta. Nopeuden mittaamiseen tarkoitettu tutka perustuu Doppler-ilmiön mukaiseen taajuuden muutokseen: lähestyvä kappale kasvattaa ja loittoneva kappale pienentää vastaanottimessa havaittavaa taajuutta. Pienillä nopeuksilla muutos on suoraan verrannollinen kappaleen ja tutkan suhteelliseen nopeuteen; hyvin suurilla nopeuksilla verrannollisuus on hieman monimutkaisempi suppean suhteellisuusteorian mukaisesti. Periaatetta on hyödynnetty niin Merkuriuksen päivän pituuden kuin autojen nopeuden määrittämiseen. Tähtitieteilijöiden ja meteorologien tarkoituksiin soveltuu Doppler-tutkan ohella myös amplitudia taajuusalueessa mittaava tutka: jokainen kappale absorboi sille ominaisia aallonpituuksia voimakkaammin kuin muita, mikä antaa havaitsijalle tietoa sen kemiallisesta koostumuksesta ja rakenteesta. Lisäksi etäisyyttä on mahdollista mitata erittäin tarkasti hyödyntämällä heijastuneen aallon vaiheen muutosta ja interferenssiä [3].

Sotilaallisissa sovelluksissa tavattavien, sironnan voimakkuuteen vaikuttavien rakenteiden analysointi auttaa ymmärtämään Thereminin laitteen toimintaa, sillä destruktiivinen interferenssi on perustava mekanismi molempien toiminnan takana. *Häivetekniikka* hyödyntää karkeasti ottaen kolmea periaatetta. Ensimmäinen on laitteen osien muotoilu: tyypillisesti rosainen kappale näkyy siloista kehnommin tutkassa, sillä epätasainen pinta sirottaa tulevan aallon eri suuntiin. Toinen keino on pinnoittaa laite vaimentavalla materiaalilla tai vaihetta muuttavalla heijastimella. Vaimennin absorboi mahdollisimman suuren osan tulevan aallon tehosta lämmöksi. Häivetekninen heijastin taas pyrkii jakamaan tulevan tehon kahteen osaan. Kaksi siroavaa aaltoa 180-asteen vaihesiirrossa tuottaa destruktiivisen interferenssin, jolloin laite ei heijasta mitään. Tällaiset resonoivat ratkaisut ovat tyypillisesti kapeakaistaisia, tietylle aallonpituudelle kerrallaan räätälöityjä [4].

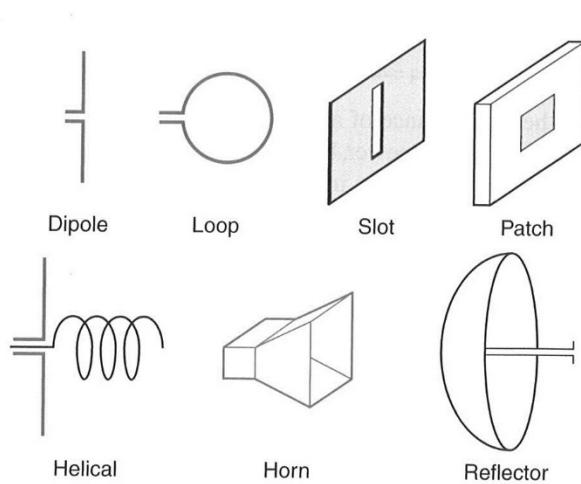


Kuva 1. Kopio alkuperäisestä seinätaulusta ja salakuuntelulaitteesta sen takana [5], [6]. Puukaiverruksen aiheena oli Yhdysvaltain vaakunan etupuoli, jossa valkopäämerikotka pitelee kolmeatoista nuolta ja oliivipuun oksaa, jossa kasvaa kolmeatoista oliivia. Oikealla näkyy salakuuntelulaitteen asemointi puukotkan taakse [7].

2. Salakuuntelulaitteen toiminnan kuvauksessa tarvittavia käsitteitä

Tässä luvussa esitellään käsitteitä, joiden avulla luvussa 3 analysoidaan Thereminin salakuuntelulaitteen toimintaa.

2.1 Antennien peruskäsitteitä ja sijaiskytkentä



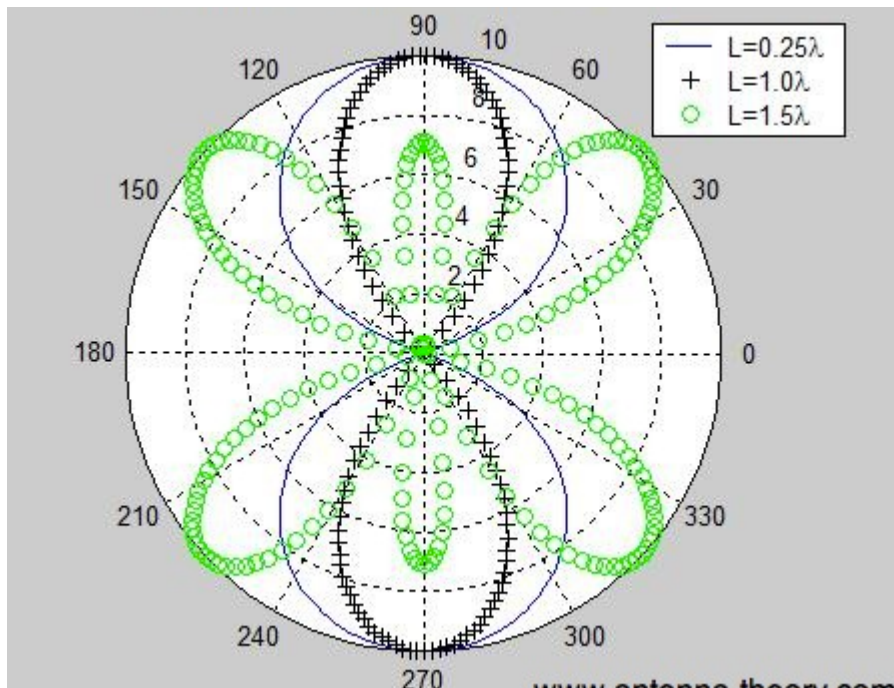
Kuva 2. Erilaisia antennityyppejä: dipoli-, silmukka-, rako-, lappu-, heliksi-, torvi- ja heijastinantenni [8].

Antenni on laite, joka toimii muuntimena sähkövirran ja sähkömagneettisen säteilyn välillä. Suunnitteluparametreja, kuten kokoa ja muotoa muuttamalla on mahdollista suunnitella ominaisuuksiltaan erilaisia antenneja. Sähköisiä ominaisuuksia ovat mm. suuntaavuus, vahvistus, säteilykuvio, polarisaatio ja impedanssi. Suuntaavuus D määritellään antennin säteilykuvion maksimin suuntaan säteilyyn tehon P_{max} suhteena keskiarvoon koko avaruusympyrän yli:

$$D = 4\pi \frac{P_{max}}{\int P(\theta, \phi) d\Omega} \quad (1)$$

Tasaisesti ympärilleen säteilevää antennia kutsutaan isotrooppiseksi ja sen suuntaavuus on 0 dBi. Kuvaan 2 on koottu yleisimpiä antennityyppejä, joiden suuntaavuus vaihtelee aina lyhyiden dipolien 2 dBi:stä heijastinantennien yli 30 dBi:iin. Käyttötarkoituksesta riippuu, halutaanko antennin olevan mahdollisimman suuntaava eli kohdistavan säteilytehon kapeaan keilaan, vai mahdollisimman isotrooppinen. Usein tarkoituksenmukaisempi suure on antennin vahvistus G , joka määrittelyssään (2) ottaa huomioon antennissa esiintyvät lämpöhäviöt säteilyhyötysuhteen η_{rad} avulla. Vahvistus ei IEEE:n määritelmän mukaan huomioi impedanssi- tai polarisaatioepäsovittusta.

$$G = \eta_{rad} D \quad (2)$$



Kuva 3. Eripituisten dipoliantennirakenteiden säteilykuvioiden vertailu [9].

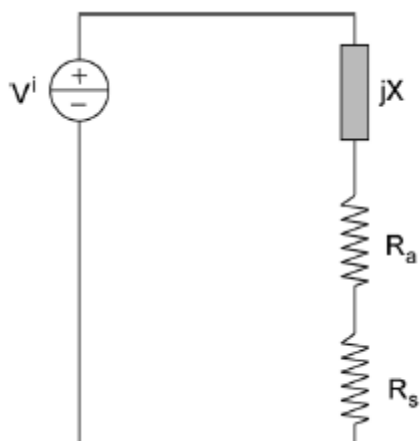
Kuvasta 3 nähdään kuinka saman dipoliantennin vahvistus ja suuntakuvio muuttuvat taajuuden mukana: lyhyen dipolin vahvistus on 1,76 dBi ja puolen aallon dipolin 2,15 dBi. Taajuuden edelleen noustessa keilojen määrä kasvaa alkuperäisestä kahdesta.

Suuntaavan antennin säteilykuvion pääkeilanleveyden θ_{3dB} ja vahvistuksen välillä on voimassa approksimaatio

$$G = \frac{27000}{\theta_{3dB}^2}, \quad (3)$$

jossa keilanleveys on ilmoitettu asteina [4].

Antennin toimintaa on vastaanotossa mahdollista kuvata esimerkiksi kuvassa 4 esitetyn sarjasijaiskytkennän avulla. Sijaiskytkennässä antenni esitetään kompleksisena impedanssina $Z_A = R_A + R_s + jX_A$, jossa esiintyvä R_s kuvaa lämpöhäviöitä.



Kuva 4. Antennin sijaiskytkentä [10].

Dipoliantennille jännite V lasketaan tehollisen pituusvektorin \mathbf{h} ja tulevan sähkökentän voimakkuuden \mathbf{E} tulon avulla

$$|V| = |\mathbf{h} \cdot \mathbf{E}| = \frac{c_0}{\pi f} \left(1 - \cos\left(\frac{\omega}{c_0} L\right)\right) |\mathbf{E}|, \quad (4)$$

jossa L on antennin pituus [11].

Toiminnalliset alueet antennin ympärillä on mahdollista jakaa karkeasti lähi- ja kaukokenttään. Yleinen määritelmä kaukokentälle, kun L_{max} on antennin pisin dimensio [12], on

$$r > \frac{L_{max}^2}{\lambda}. \quad (5)$$

Toiset lähteet ilmoittavat kaksikin kertaa suuremman minimietäisyyden antennin kaukokentälle, joten oikea raja on valittava tapauskohtaisesti.

Lineaarisesti polarisoitujen lähtetin- ja vastaanottoantennin välinen epäsovitus vaimentaa vastaanotettua signaalia. Vaimennukselle voidaan kirjoittaa

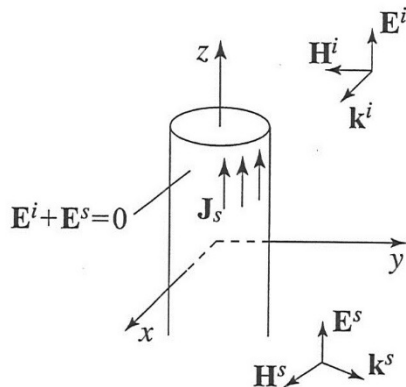
$$L_{P,dB} = 20 \lg(\cos \phi), \quad (6)$$

kun ϕ on antennien polarisaatioiden välinen kulma. Näin ollen polarisaatioepäsovituksesta johtuva vaimennus on pienimmillään 0 dB ja suurimmillaan kulman ollessa 90 astetta.

2.2 Sirontailmiö ja kohteen tutkapoikkipinta-ala.

Suomennos Penttilän, Keskilammin, Sydänheimon ja Kivikosken englanninkielisestä artikkelista kiteyttää sironnan käsitteen [13]: “Sähkömagneettisen kentän energiaa heijastuu, välittyy ja absorboituu, kun aalto kohtaa tyhjässä avaruudessa kohteen, jolla on sille ominainen permittiivisyys ε ja permeabiliteetti μ . Johteessa elektronit ovat vapaita liikkumaan vaihtuvan sähkökentän mukaisesti ja nollaamaan pinnan suuntaisen kentän. Aikariippuva, tuleva kenttä aiheuttaa aikariippuvan välimatkan varausten välille, mikä tarkoittaa virtaa. Nämä varaukset ja virrat toimivat sironneen kentän lähteinä.”

Sironnasta voi radiotekniikan sovelluksesta riippuen olla hyötyä tai haittaa: esimerkiksi ionosfäärissä tapahtuvaa sirontaa voidaan hyödyntää suorassa radioyhteydessä pitkän, jopa 2000 km matkan taakse. Toisaalta etenevä aalto menettää tehoaan väliaineessa tapahtuvan sironnan vuoksi [14].



Kuva 5. Johtavaan sylinteriin indusoituva virta tasoaaltokentässä. Tulevan aallon sähkökenttä on sylinterin akselin suuntainen [15]

Kuvassa 5 johdesylinteriin indusoituu virta tulevan ja siroavan kentän yhteisvaikutuksesta. Merkitään tulevaa ja siroavaa tasoaaltoa seuraavasti k_0 :n ollessa etenemiskerroin:

$$\mathbf{E}_i(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_i e^{-jk_0 \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{r}}, \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_s e^{-jk_0 \mathbf{u}_s \cdot \mathbf{r}}, \quad (8)$$

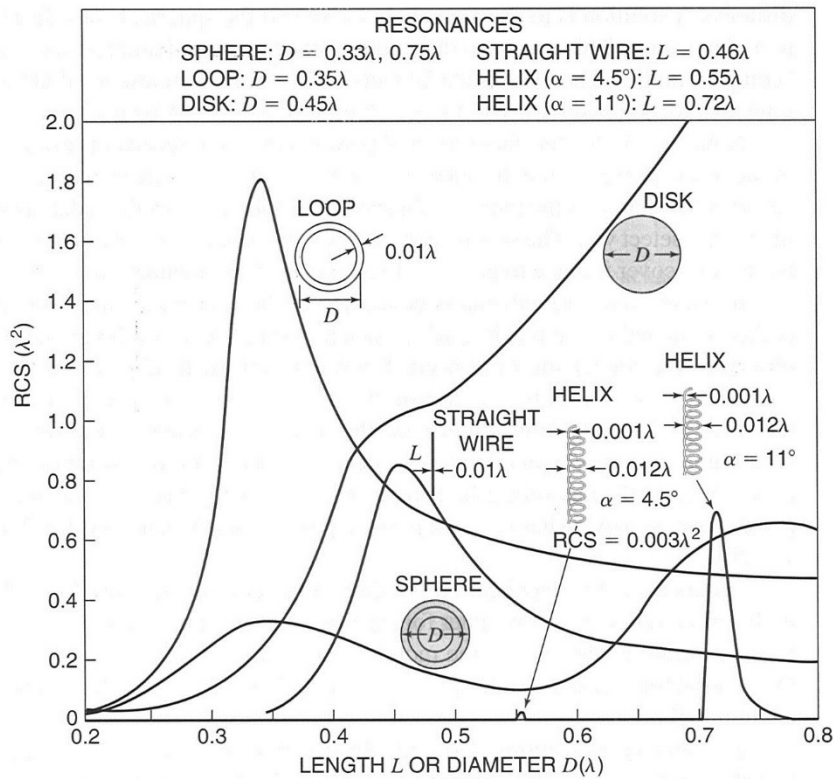
$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}. \quad (9)$$

Vektorit $\mathbf{u}_{i,s}$ ovat tulevan ja sironneen aallon etenemissuuntaisia yksikkövektoreita, kuten kuvasta 5 ilmenee. Mikäli tuleva tasoaalto \mathbf{E}_i kohtaa origossa olevan kohteen, ja kaukaisuudessa mitataan kohteesta sironnut kenttä \mathbf{E}_s voidaan kohteelle määritellä sirontapoikkipinta-ala $\sigma_S(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_s)$

$$\sigma_S(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_s) = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[\frac{4\pi r^2 |\mathbf{E}_s(\mathbf{r})|^2}{|\mathbf{E}_i(0)|} \right]. \quad (10)$$

Monostaattinen tutkapoikkipinta-ala (11) kuvaa sironnan voimakkuutta aallon tulosuuntaan ja se on kirjoitettavissa sirontapoikkipinta-alan yhtälöstä (10) johtuen heijastuneen ja tulevan tehotiheyden suhteen avulla

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{S_{\text{heijastus}}}{S_t}. \quad (11)$$



Kuva 6. Muodoltaan yksinkertaisten johdekappaleiden tutkapoikkipinta-aloja matalilla taajuuksilla. [8]

Kuvassa 6 on esitetty muodoltaan yksinkertaisten johdekappaleiden tyypillinen tutkapoikkipinta-alan käyttäytyminen taajuuden (kappaleen koon) kasvaessa: pallon ja renkaan ensimmäinen maksimi sijoittuu taajuudelle, jolla sen ympärysmitta on aallonpituuden pituinen; ohuen sylinterin resonanssitaajuudella sen pituus on $0,46 \lambda$ eli hieman alle puoli aallonpituutta. Pienillä taajuuksilla sironta voimistuu kutakuinkin verrannollisena taajuuden neljänteen potenssiin ja saavuttaa maksiminsa antennilangan pituuden ollessa puolen aallonpituuden luokkaa. Taajuuden edelleen kasvaessa käyrä toistaa itseään aallonpituuden välein [8], [16].

Kuitenkin on oleellista, että kohteen tutkapoikkipinta-ala on suuntariippuvainen suure, kuten yleisen sirontapoikkipinta-alan yhtälöstä (10) ja kuvasta 3 ilmenee. Toteutunut sironta riippuu sekä kohteen orientaatiosta suhteessa tulevaan kenttään, että suunnasta, josta sirontaa mitataan.

2.3 Impedanssilla kuormitetun antennin sironta ja tutkapoikkipinta-ala

Impedanssilla Z_L kuormitetun antennin toimintaa sirottajana voidaan kuvata kahden termin summana: rakenteellinen sironta E_{struct} ja antennisironta E_{ant} , mikä jako ilmenee yhtälöstä [13]

$$\sigma = \frac{1}{\pi} \left| 2\pi r \frac{E_{struct}}{E_{inc}} - (1 - \rho_A) \pi r \frac{E_{ant}}{E_{inc}} \right|^2. \quad (12)$$

Antennisironta johtuu antennin ja kuorman välisen impedanssiepäsovituksen aiheuttamasta heijastuksesta. Heijastuskerroin ρ_A lasketaan antennin ja kuorman impedanssien avulla

$$\rho_A = \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L}. \quad (13)$$

Rakenteellisella sironnalla tarkoitetaan tulevan kentän antenniin indusoiman virran säteilyä: jokainen virta-alkio avaruudessa säteilee riippumatta virran syntytavasta. Näin ollen esimerkiksi oikosuljettu dipoliantenni sirottaa kuin samanpituinen johdetanko. Mikäli jälkimmäinen yhtälön (12) termeistä on suhteessa ensimmäiseen hyvin pieni, voidaan yhtälöä yksinkertaistaa. Impedanssilla Z_L päätetylle antennille, jonka vahvistus G ja syöttöpisteimpedanssi $Z_a = R_a + jX_a$ tunnetaan, voidaan laskea tutkapoikkipinta-ala seuraavan yhtälön mukaisesti [17]:

$$\sigma = \frac{\lambda^2 G^2 R_a^2}{\pi |Z_a + Z_L|^2}. \quad (14)$$

Edelleen, mikäli yhtälöä (14) sovelletaan puolen aallon mittaisen ohuen sylinterin maksimitutkapoikkipinnan laskemiseen, voidaan kirjoittaa

$$\sigma_{max} = \frac{\lambda^2 G^2}{\pi}, \quad (15)$$

sillä resonanssitaajuudella antennin reaktanssi X_a on nolla. Yhtälö (15) on sopusoinnussa kuvassa 6 esitetyn, noin $0,85\lambda^2$:n kanssa.

2.4 Amplitudi- ja vaihemoduloitu kantoaalto

Informaation siirto radioyhteyden avulla perustuu kantataajuiseen, ei-informatiiviseen signaalin modulointiin siksi, että kaikki informaation muodostavat taajuudet eivät sellaisinaan sovellu siirrettäviksi. Esimerkiksi ääni koostuu signaaleista, joiden taajuus vaihtelee tekijällä tuhat ollen alimmillaan noin 20 Hz. Radioyhteydessä käytettävien antennien on tyypillisesti oltava aallonpituuden kanssa suunnilleen samaa suuruusluokkaa. Kuitenkin matalimman ihmisen kuuleman äänitaajuuden sähkömagneettinen aallonpituus olisi viisitoista tuhatta kilometriä. Tämän takia radioyhteydellä tapahtuvaan viestintään valitaan tietty, informaatio-signaaliin nähden korkea taajuus, jota sitten moduloidaan. Analogiset modulaatiomenetelmät perustuvat amplitudin, vaiheen tai taajuuden modulointiin.

Puhdas amplitudimoduloitu signaali voidaan esittää muodossa

$$E(t) = E_0 [1 + \mu \cos(\omega_\mu t)] \cos(\omega_c t), \quad (16)$$

jossa modulaatioindeksi μ kuvaa modulaation voimakkuutta ja ω_μ moduloivan signaalin taajuutta. Yhtälö (16) on kirjoitettavissa kolmen eri taajuiseen signaalikomponentin summana [18]: kantataajuinen, summataajuinen ja erotustaajuinen komponentti

$$E(t) = E_0 \cos(\omega_c t) + \frac{1}{2} E_0 \mu \cos((\omega_c + \omega_\mu)t) + \frac{1}{2} E_0 \mu \cos((\omega_c - \omega_\mu)t). \quad (17)$$

Koska signaalin teho on verrannollinen signaalin voimakkuuden neliöön

$$P \sim E^2, \quad (18)$$

voidaan summataajuuden ja kantataajuuden tehojen suhteeksi kirjoittaa

$$\frac{P_\mu}{P_c} = \left(\frac{\mu}{2}\right)^2. \quad (19)$$

Koska myöhemmin tehoja halutaan verrata simulaatioista saatuun tutkapoikkipinta-alan muutokseen kalvon eri asennoissa, kirjoitetaan edelleen yhteys kalvon liikkeen salliman maksimitutkapoikkipinta-alan ja summataajuiseen aallon tehon P_μ välille:

$$P_{max} = P_c (1 + \mu)^2, \quad (20)$$

$$\frac{P_\mu}{P_c} = \frac{1}{4} \left(\sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\sigma}} - 1 \right)^2. \quad (21)$$

Mikäli yhtälössä (21) neliöjuuren sisällä oleva osamäärä on erittäin lähellä yhtä, voidaan tehdä Taylorin sarjaan pohjautuva approksimaatio

$$\frac{P_\mu}{P_c} = \frac{1}{16} \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_c} \right)^2. \quad (22)$$

Puhdas vaihemodulaatio (taajuusmodulaation) vuorostaan on

$$E(t) = E_0 \cos[\omega_c t + \beta \sin(\omega_\mu t)]. \quad (23)$$

Mikäli vaihemodulaation yhtälössä esiintyvä modulaatiokerroin β on paljon pienempi kuin 1 radiaania, voidaan sitä approksimoida kosinien summakaavan $\cos(a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$ avulla kolmen taajuuskomponentin summana

$$E(t) \approx E_c \cos(\omega_c t) + \frac{1}{2}\beta E_c \cos((\omega_c + \omega_\mu)t) - \frac{1}{2}\beta E_c \cos((\omega_c - \omega_\mu)t). \quad (24)$$

Puhtaan vaihemodulaation kohdalla summa- ja kantataajuuden tehojen suhteeksi saadaan siis

$$\frac{P_\mu}{P_c} = \left(\frac{\beta}{2}\right)^2. \quad (25)$$

Yleisesti taajuusmoduloidun signaalin spektri sisältää äärettömän määrän taajuuskomponentteja kolmen asemesta: yhtälön johtamisessa käytetty approksimaatio β :n pienuudesta rajoittaa esiintyvien taajuuskomponenttien määrän kolmeen. Yhdistetty AM/FM-moduloitu signaali sisältää samat taajuuskomponentit, kuin puhdas FM-moduloitu signaali, mutta komponenttien amplitudit muuttuvat [19].

2.5 Radioyhteys

Lähetin- ja vastaanottoantennin suuntaavuuksien $G_{r,t}$ ja niiden keskinäisen välimatkan R avulla voidaan kirjoittaa Friin kaava radioyhteydelle eli

$$\frac{P_r}{P_t} = G_r G_t \left(\frac{c_0}{4\pi f R}\right)^2, \quad (26)$$

jossa P_t on lähetetty teho. Yhdessä sirottajan tutkapoikkipinta-alan σ kanssa Friin kaavaa (26) voidaan soveltaa laskettaessa vastaanottoantenniin kohteesta siroava teho P_r , kun $R_{t,r}$ ovat salakuuntelulaitteen etäisyydet lähetin- ja vastaanottoantennista.

$$\frac{P_r}{P_t} = \sigma G_r G_t \left(\frac{c_0}{f}\right)^2 \left(\frac{1}{R_r R_t}\right)^2 \left(\frac{1}{4\pi}\right)^3 \quad (27)$$

Yhtälöä (27) kutsutaan tutkayhtälöksi.

Taustakohinan suuruus on suoraan verrannollinen lämpötilaan T ja signaalin kaistanleveyteen B :

$$P_{kohina} = kTB, \quad (28)$$

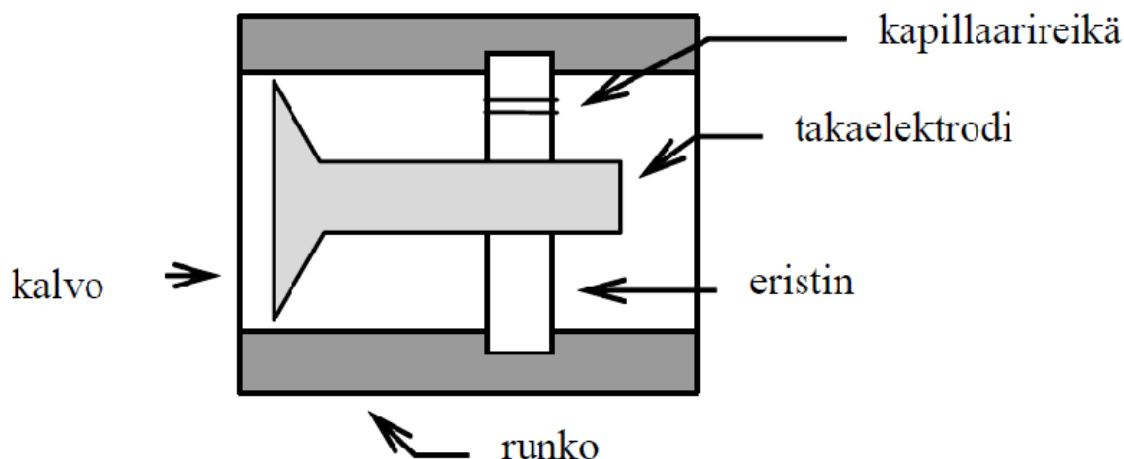
jossa k on Boltzmannin vakio.

SIR (engl. ”signal-to-interference ratio”) on luku, joka kuvaa moduloidun kantoaallon tehon P_c suhdetta samalla taajuuskaistalla esiintyvään interferoivaan tehoon P_{interf} . Interferoiva teho on peräisin esimerkiksi muista samaa taajuutta käyttävistä lähettimistä tai ympäristön heijastuksista.

$$SIR = 10 \lg\left(\frac{P_c}{P_{interf}}\right) \quad (29)$$

Jotta signaali voidaan vastaanottaa, on sen oltava riittävän voimakas kohinaan ja interferenssiin verrattuna.

2.6 Tyypillisen kondensaattorimikrofonin rakenne ja puheen äänenpaine



Kuva 7. Kondensaattorimikrofonin periaatteellinen rakenne [20].

Koska salakuuntelulaitteen rakenne muistuttaa tavallista kondensaattorimikrofonia, on kondensaattorimikrofonien yhteydessä käytettävä analyysi sopiva mallintamaan sen mikrofoniollisia ominaisuuksia. Tyypillisessä kondensaattorimikrofonissa kalvon ja takelektrodin välille luodaan esijännite U esimerkiksi pariston tai ulkoisen jännitelähteen avulla. Thereminin kojeessa esijännitys syntyy antennilangan sylinterin sisälle kytkemästä vaihtovirrasta. Kalvon liike mukailee äänenpaineen muutoksia ja näin kalvon ja takelektrodin välisen ilmapälin suuruus muuttuu. Ilmapälin määrittää kalvon ja takelektrodin välisen kapasitanssin, jonka muutos aikaansaa virran eli varauksen muutoksen aikayksikössä

$$I = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dC(t)}{dt} U. \quad (30)$$

Tasokondensaattorin kapasitanssin ja ilmapälin d välillä on kääntäen verrannollinen yhteys. Kun A on tasojen pinta-ala, tasokondensaattorin kapasitanssi on

$$C_{gap} = \epsilon \frac{A}{d}. \quad (31)$$

Normaalin puheen äänenpaine p yhden metrin etäisyydellä on noin 20 mPa. Tämä vastaa 60 dB äänenpainetasoa, joka lasketaan äänenpaineen suhteena referenssiäänepaineeseen $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$:

$$P = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (32)$$

Ilmamolekyylien liikkeen maksimipoikkeama on laskettavissa äänenpaineen ja -nopeuden, ilman tiheyden ja puheen taajuuden perusteella

$$\Delta d = \frac{p}{\rho c 2\pi f}. \quad (33)$$

Kapillaarireiän tehtävänä on sallia ilmanvaihto kondensaattorimikrofonin sisä- ja ulkopuolen välillä: muutoin luonnollinen ilmanpaineenvaihtelu loisi staattisen poikkeaman kalvon asentoon. Se on luonteeltaan siis alipäästösuodatin [20], [21].

2.7 Onteloresonaattorin toiminta ja sijaistykentä

Resonaattori on rakenne, joka varastoi sähkömagneettista energiaa edestakaiseksi värähtelyksi sähkö- magneettikentän välillä. Niitä käytetään mm. suodattimissa, oskillaattoreissa, taajuusmittareissa ja materiaalitunnistimissa. Rakenteensa puolesta resonaattorit voidaan jakaa suljettuihin ja avoimiin: jälkimmäisissä heränneet kentät jatkuvat periaatteessa äärettömyyteen, edellisissä johdemateriaali rajaa kentille äärellisen tilan. Oleellisia resonaattoreita kuvaavia parametreja ovat resonanssitaajuus ja hyvyysluku, jotka määräytyvät resonaattorin rakenteesta, koosta ja materiaaleista. Resonanssitaajuudella värähtelevät kentät aiheuttavat rakenteeseen kaikkein voimakkaimman energiasisällön. Hyvyysluku puolestaan kuvailee resonanssin taajuusselektiivisyyttä ja on kääntäen verrannollinen kaistanleveyteen ja häviöihin, mikä ilmenee yhtälöstä (34):

$$Q = \omega_r \frac{W}{P_L} = \frac{f_r}{2\Delta f_{3dB}}. \quad (34)$$

Yllä hyvyysluku on ilmoitettu verrannollisena resonaattorin sisältämän energian W ja häviötehon P_L suhteeseen. Häviöteho koostuu eriste-, johde- ja kytkentähäviöistä. Suljettujen resonaattoreiden kohdalla kytkentähäviöllä tarkoitetaan reiättömän ja reiällisen resonaattorin häviöiden erotusta: tehon kytkemiseksi ontelo on yleensä jotenkin puhkaistava. Mikroaaltoalueen resonaattorit ovat tyypillisesti suljettuja metallioneloita. [22]-[24].

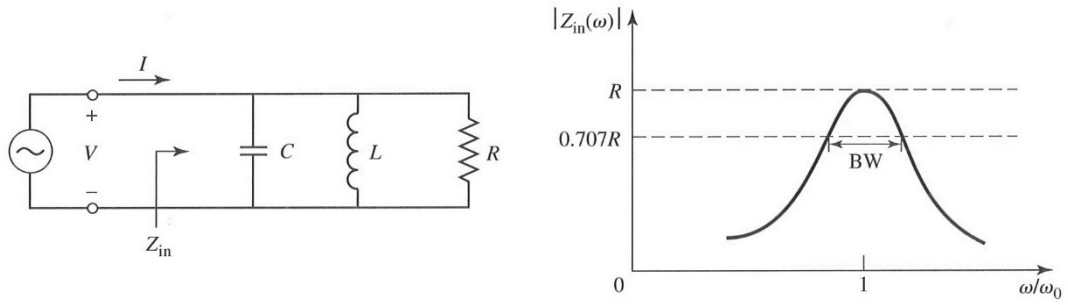
Resonanssitaajuuden ja hyvyysluvun avulla resonaattorirakenteen toimintaa on mahdollista mallintaa keskitetyin komponentein, jollainen on esitetty kuvassa 8. Onteloresonaattorille rakennettu piirimalli on aaltomuotokohtainen, joten tarkastelusta riippuen vastinpiirejä saatetaan tarvita useita.

$$Q = \omega_r RC = \frac{R}{\omega_r L} \quad (35)$$

$$Z(\omega) = \left(\frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right)^{-1} \quad (36)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (37)$$

Resonanssitaajuudella (37) kompleksisen impedanssin (36) imaginääriosaa on nolla, jolloin rinnakkaisresonaattorin impedanssin itseisarvo saavuttaa maksiminsa, kuten kuvassa 8 on esitetty.



Kuva 8. Rinnakkaisresonaattori ja sen impedanssi normalisoidun kulmataajuuden funktiona [24].

Floch ja kumppanit [25] ovat esittäneet kuvassa 9 esitetyn, säädettävän lieriöresonaattorin Q-arvon laskentatavan Fujisawan artikkeliin [26] perustuen:

$$L = \mu_0 \frac{h}{2\pi} \ln \left(\frac{r_{cav}}{r_{post}} \right), \quad (38)$$

$$C_1 = 4\epsilon_0 r_{post} \ln \left(\frac{e \sqrt{(r_{cav} - r_{post})^2 + h^2}}{2d} \right), \quad (39)$$

$$C = C_1 + C_{gap}, \quad (40)$$

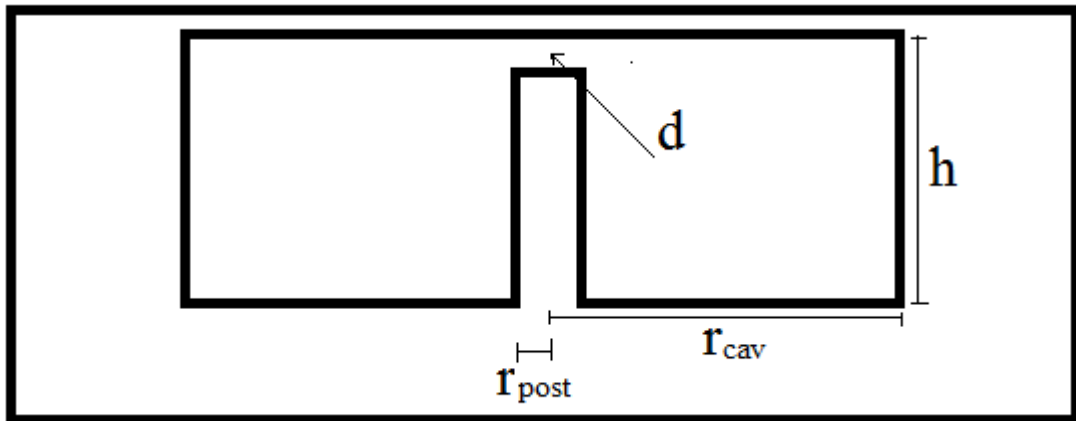
$$R = \frac{2\pi\omega^2 L^2}{R_S \left(\frac{h-d}{r_{post}} + \frac{h}{r_{cav}} + 2 \ln \left(\frac{r_{cav}}{r_{post}} \right) \right)}, \quad (41)$$

$$R_S = \frac{1}{\sigma\delta}, \quad (42)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}}, \quad (43)$$

$$Q_0 = \frac{\omega_0\mu_0}{R_S} \frac{h \ln \left(\frac{r_{cav}}{r_{post}} \right)}{\frac{h}{r_{post}} + \frac{h}{r_{cav}} + 2 \ln \left(\frac{r_{cav}}{r_{post}} \right)}. \quad (44)$$

Yhtälöissä (38)-(44) esiintyvät termit on liitetty kontekstiinsa kuvassa 9: d on ilmapäli, h sylinterin korkeus, r_{cav} sylinterin säde ja r_{post} takaelektrodin säde.

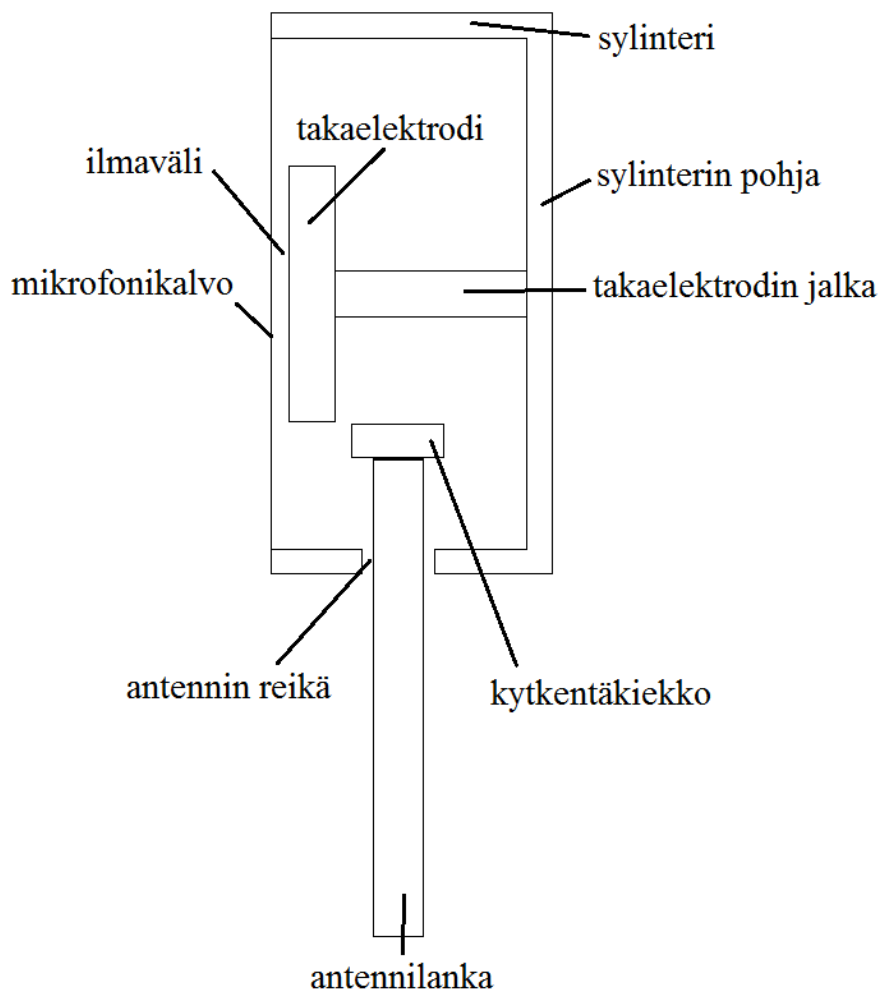


Kuva: 9 Salakuuntelulaitteen onteloresonaattoria muistuttava rakenne, johon yhtälöt (38)-(44) viittaavat [25].

Koska takaelektrodin ja antennilangan lisääminen kuvan 9 esittämään rakenteeseen pienentää resonaattorin tilavuutta, on yhtälöin (37)-(40) laskettava resonanssitaajuus todennäköisesti jonkin verran todellisuutta pienempi.

3. Alkuperäisen laitteen rakenne ja toiminta

3.1 Laitteen osat ja mitoitus



Kuva 10. Salakuuntelulaitteen rakenteen havainnekuva, jossa tässä työssä käytetyt termit ovat liitettyinä kontekstiinsa.

Great Navy Seal -taulun sisään piilotetun salakuuntelulaitteen rakenne käy ilmi kuvasta 10. Hopealla päällystetty, sisähalkaisijaltaan noin 20 mm mittainen kupariputki eli sylinteri oli suljettu takapäästään metallikiekkolla (sylinterin pohja) ja etupää oli peitetty mikrofonikalvolla. Sylinterin pohjaan oli kiinnitetty takaelektrodi jalkoineen siten, että mikrofonikalvon ja takaelektrodin väliin jäi pieni ilmaväli. Mikrofonikalvon, takaelektrodin ja sylinterin välillä oli galvaaninen yhteys, mutta antennilanka kytkentäkielellä oli ujutettu sylinterin sisälle kyljessä olevan reiän kautta ja kiinnitetty paikoilleen eristeaineen avulla. Mikrofonikalvon ja takaelektrodin välistä ilmaväliä oli mahdollista säätää portaattomasti: takaelektrodin jalan ja sylinterin pohjan välinen kiinnitys oli toteutettu ruuvikiertein. Thereminin salakuuntelulaitteen pisin mitta oli hieman alle 25 cm, joten Great Navy Seal -taulu oli riittävän suurikokoinen kätkemään laitteen kokonaisuudessaan. Ääniaaltoja varten taulussa oli äänilähdettä kohti avautuvia

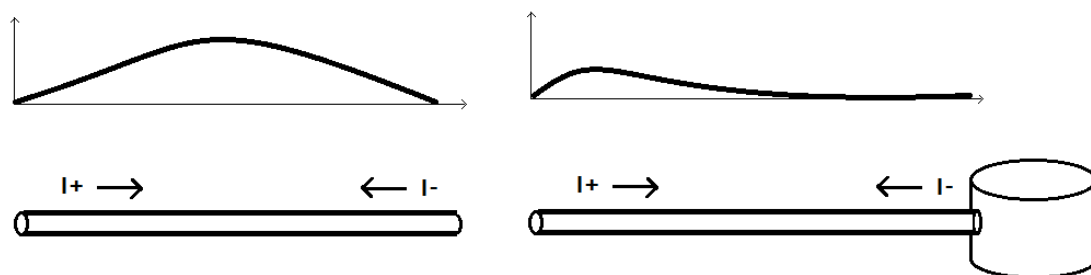
reikiä: puukotkan nokan kohdalle oli porattu aukkoja ja mikrofonikalvo sijaitsi juuri näiden kohdalla [27].

3.2 Oletettu toimintaperiaate kvalitatiivisesti

Tässä työssä on oletettu vuosien takaisen salakuuntelun Thereminin laitteen avulla perustuneen kolmeen asiaan:

1. Laitetta valotettiin yksitaajuisella sähkömagneettisella säteilyllä
2. Puheen äänenpaineen liikuttama metallikalvo vaikutti lieriörakenteen resonanssitaajuuteen, mikä edelleen vaikutti laitteesta sironneen aallon voimakkuuteen ja vaiheeseen.
3. Amplitudi- ja vaihemoduloitu takaisinheijastunut signaali otettiin vastaan ja demoduloituun kaiuttimiin ääneksi.

Dynaamisessa kentässä metalliseen antennilankaan indusoituu virta, joka säteilee. Kuvaan 11 alla on luonnosteltu rakenteeseen indusoituvan kokonaisvirran mahdollista jakaumaa. Alle puolen aallonpituuden mittaiseen ohueen johtimeen syntyvää virtaa voidaan approksimoida usein sinikäyrällä (kuvassa vasemmalla) hyvällä tarkkuudella. Kuitenkin, mikäli rakennetta poikkeutetaan esimerkiksi päättämällä johtimen toinen pää sylinterioskillaattorilla (kuvassa oikealla), virtajakauma muuttuu. Eri suuntien kulkevien virtojen säteilyn voidaan ajatella interferoivan destruktiivisesti.



Kuva 11. Havainnollistava luonnostelma virran jakautumisesta johdekappaleessa ilman sylinteriä ja sylinterin kanssa. Eri suuntiin kulkevien virtojen summa riippuu niiden suhteellisesta vaiheesta toisiinsa nähden.

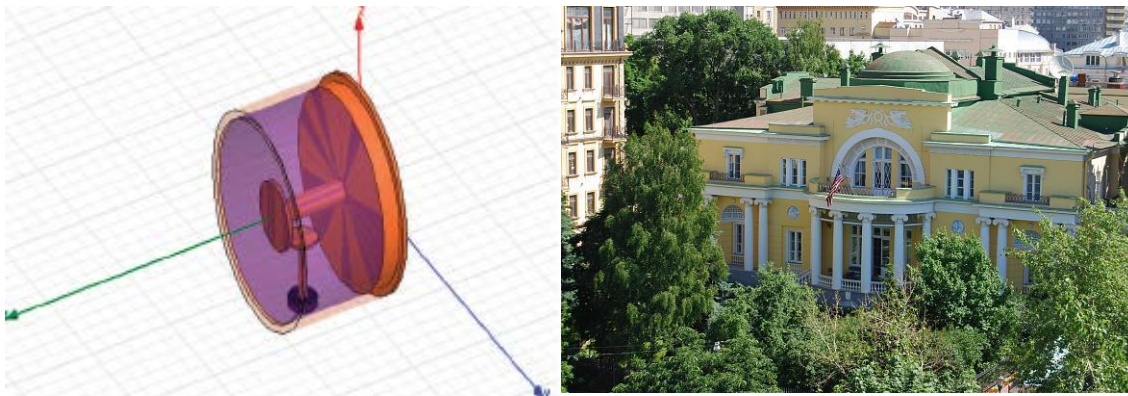
Onteloresonaattorin resonanssitaajuuden läheisyydessä salakuuntelulaitteen toiminta moduloivana takaisinsirottajana on mahdollisesti riittävän herkkä pienelle kalvon liikkeelle. Tällöin kalvon äänenpainetta mukaileva liike kasvattaa tai pienentää sironneen sähkökentän amplitudia ja vaihetta.

Koska alkuperäinen salakuuntelulaite oli sijoitettu ikkunalliseen huoneeseen ja valotus ynnä kuuntelu tapahtui ulkoa käsin, osa tehosta heijastui rakennuksen julkisivusta. Tämä heijastus on interferoiva häiriö, joka saattaa peittää kuunneltavan signaalin alle. Interferenssin vaikutusta on mahdollisesti kyetty vähentämään sijoittamalla lähetin- ja vastaanottoantenni eri julkisivuille. Toinen mahdollisuus on ollut käyttää 45-asteen polarisaatioepäsovitusta: valotussähkökenttä olisi esimerkiksi 45 astetta vertikaalisesta vastapäivään, salakuuntelulaite vertikaalinen ja vastaanottoantenni edelleen 45 astetta vertikaalisesta myötäpäivään. Tämän vaimentava vaikutus interferoivaan heijastukseen olisi luokkaa 20 dB ja signaaliin ainoastaan 6 dB.

3.3 Vaihtoehtoisen toimintaperiaatteen esittely

Brookerin ja Gomezin artikkelissa [27] on arvioitu Thereminin salakuuntelulaitteen toimineen mahdollisesti edellisessä kappaleessa kuvaillusta poikkeavalla tavalla. Kirjoittajat ovat esittäneet, että vastaanottopäässä olisi kuunneltu kantataajuisen signaalin harmonista monikertaa. Alkuperäisen sylinteriresonaattorin seinät olivat hopealla päällystettyä kuparia. Lisäksi sylinteriresonaattori oli koottu useammasta erillisestä kappaleesta, esim. sylinterin pohja kiinnittyi sylinteriputkeen ruuvikierteen avulla, mikä näkyy kuvasta 12. Metallien välisiä erilaatuisia liitoksia oli siis ainakin muutamia ja näitä kirjoittajat arvioivat passiivisten intermodulaatiokomponenttien synnyttäjiksi. Antennilanka olisi ollut 600 MHz lähetystaajuudella puolen aallon mittainen ja valitsemallaan ilmapälillä he simuloivat sylinteriresonaattorin resonanssitaajuudeksi 1800 MHz.

Kuvassa 12 näkyy myös suurlähetystön julkisivu, joka salakuuntelun kannalta haitallisesti sirottaa osan tulevasta kentästä. Siroava kenttä interferoi lähetystön sisältä salakuuntelulaitteesta tulevan signaalin kanssa. Mikäli kuunneltava signaali olisi lähetystaajuuden kolmas monikerta, ympäristön heijastusten interferoiva vaikutus vähenisi oleellisesti.



Kuva 12. Bookerin ja Gomezin HFSS-malli sylinteristä ja suurlähetystön julkisivu. Kuvasta vasemmalla näkyy, kuinka resonaattorin pohja on tehty eri kappaleesta [27], [28].

Kirjoittajat sijoittavat arviossaan salakuuntelulaitteen harmonisten taajuuskomponenttien tuottajana tyypillisten yleisradioantennien ja Schottky-diodien väliin: harmonisen tehon suhde kantataajuuteen olisi näin ollen -160 ja -25 dB:n välillä. Tämän suhteen suuruus on ratkaisevaa vaihtoehtoisen toimintaperiaatteen toteutettavuuden kannalta.

Oletusta toimintaperiaatteesta 2 tukee hieman laitteen dokumentoitu rakenne: sylinterin ensimmäinen resonanssitaajuus kirjoittajien valitsemalla ilmapälillä on kutakuinkin kolme kertaa antennilangan puolen aallon resonanssi. Tosin toinen mahdollinen selitys pituudelle on, että antennilanka oli $3/2$ -aallonpituuden mittainen; lähetys- ja vastaanotto olisivat silti tapahtuneet samalla taajuudella. Laitteessa on metalliliitoksia, joiden läpi kulkeva virta synnyttää harmonisia särökomponentteja heijastuvaan signaaliin. Brookerin ja Gomezin artikkelissa on laskelmin todettu laitteen saattaneen toimia tällä tavoin, mikäli esimerkiksi miljoonasosa heijastuvasta tehosta moduloitui passiivisesti 3. harmoniselle monikerralle.

3.4 Sijaiskytkentään perustuva malli

Salakuuntelulaitteen resonanssitaajuuden ja sen muutoksen suuruuden arvioimiseksi ilman CST-simulointia muodostetaan onteloresonaattorille kuvan 8 mukainen sijaiskytkentä. Sijaiskytkentään perustuvan mallin rakentaminen aloitetaan ratkaisemalla lukuarvot sylinteriresonaattorisijaiskytkennän komponenteille C_{gap} , C_1 , L ja R yhtälöin (30) ja (37)-(40). Messingille on laskuissa käytetty johtavuutta $\sigma = 16$ MS/m.

Taulukko 1. Sylinteriresonaattorille tehdyn sijaiskytkennän komponenttiarvot:

Sylinterin korkeus	C_{gap}	C_1	L	f_0	Q_0
9,96mm	8,250pF	76,587fF	4,6641nH	807,6MHz	656
9,961mm	8,196pF	76,589fF	4,6645nH	810,2MHz	657

Resonanssitaajuuden muutokseksi kalvon liikkumaa nanometriä kohden saadaan näin ollen 2626 Hz/nm. Koska piirin kokonaiskapasitanssin $C = C_1 + C_{gap}$ suuruus ja muutos riippuvat lähes täysin ilmavälin kapasitanssista C_{gap} , ja L on kutakuinkin vakio korkeuden pienen muutoksen suhteen, voidaan resonanssitaajuuden muutoksen laskemiseen käyttää yhtä hyvin pelkästään Taylorin approksimaatiota yhtälöistä (30) ja (36)

$$\Delta f = f_2 - f = f \left(\sqrt{\frac{C}{C_2}} - 1 \right) = f \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta d}{d}} - 1 \right) \approx \frac{1}{2} f \frac{\Delta d}{d}. \quad (45)$$

Likimääräinen ratkaisu antaa 2692 Hz/nm, mikä poikkeaa täyden sijaiskytkennän arvosta ainoastaan 2,5 prosenttia.

Maksimitutkapoikkipinta-ala arvioidaan antennilangan dipolimallin mukaisesti kaavalla (15)

$$\sigma_{max} = \frac{\lambda^2 G^2}{\pi} = 0,85 \left(\frac{L}{0,46} \right)^2 = 0,11 \text{ m}^2.$$

Maksimitutkapoikkipinta-alaa voidaan hyödyntää arvioitaessa vaadittavaa vähimmäislähetystehoa, kun tiedetään antennilangan pituus, valotus- ja kuunteluetäisyydet, ympäristön aiheuttama vaimeneminen signaaliin ja vastaanottimesta riippuva, pienin mahdollinen signaalin suhde kohinaan.

Impedanssimalli saattaa auttaa ymmärtämään takaisinsirontaa ilmiönä ja mahdollisesti tarjoaa yksinkertaisia apuvälineitä arvioida salakuuntelulaitteen rakenteen vaikutusta sen käyttäytymiseen sirottajana. Kuitenkin on huomattava, että salakuuntelulaitteen rakenteen eriyttäminen monopoli- tai dipoliantenniksi ja kuormaksi ei vastaa todellisuutta, joten tarkkaa analyysiä moduloituneesta takaisinsironnasta ei esitettyllä, hyvin yksinkertaisella sijaiskytkennällä voi tehdä.

3.5 Esimerkkilaskelma laitteen toiminnasta alkuperäisessä paikassa

Tässä kappaleessa on tarkoitus antaa esimerkkilaskelman perusteella arvio salakuuntelulaitteen toiminnasta alkuperäisessä paikassaan. Laskelman teko edellyttää

oletuksia käytetystä laitteistosta, modulaatiosta, etäisyyksistä, äänenpaineesta salakuuntelulaitteen kohdalla ja niin edelleen. Tehdyt oletukset on pyritty perustelemaan mahdollisimman hyvin.

1) Rakennuksen ulkopuolelta, 20 metrin päästä lähetetään 0,86 GHz teholtaan 10 W kantoaaltosignaali kohti salakuuntelulaitetta. Lähetyksessä käytettävä antenni on tyypiltään monielementtinen Yagi-Uda, jonka vahvistus G on 15 dBi. Kantoaallon taajuudella salakuuntelulaitteen tutkapoikkipinta-ala on $0,01 \text{ m}^2$. Sovelletaan tutkayhtälöä (27)

$$\frac{P_r}{P_t} = \sigma \left(\frac{G\lambda}{R^2} \right)^2 \left(\frac{1}{4\pi} \right)^3 = -84 \text{ dB}.$$

Oletus vahvistuksesta perustuu siihen, että voimakkaasti suuntaava Yagi-Uda-antennityyppi keksittiin vuonna 1926 [27]: yksi tutka-antennien kehitystä vauhdittanut maailmansota ennen salakuuntelua. Etäisyysarvio perustuu kuvaan 12, jossa Spaso Housen vierellä näkyy ainakin kuvaamishetkellä olleen rakennuksia. Etäisyyden kaksinkertaistaminen heikentäisi suhdetta 12 dB.

2) Rakennuksessa oleva ihminen tuottaa siniäänen, jonka taajuus on 1000 Hz. Äänenpaine salakuuntelulaitteen mikrofonikalvon kohdalla on 20 mPa. Äänen nopeus on 343 m/s ja ilman tiheys $1,204 \text{ kg/m}^3$, joten yhtälö (33) antaa kalvon maksimipoikkeamaksi 7,7 nm:

$$\Delta d = \frac{p}{\rho c 2\pi f} = 7,7 \text{ nm}.$$

Ilmavälillä 0,15 mm approksimaatio (45) antaa resonanssitaajuuden muutokseksi 22,36 kHz:

$$\Delta f \approx \frac{1}{2} f \frac{\Delta d}{d} = 22,36 \text{ kHz}.$$

Simulointeihin perustuen tutkapoikkipinta-ala muuttuu $9,7 \text{ mm}^2/\text{Hz}$. Tällöin approksimaatiolla (22) laskettava summataajuuden tehon suhde kantoaallon taajuuteen on -45 dB

$$\frac{P_\mu}{P_C} = \frac{1}{16} \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma_C} \right)^2 = -45 \text{ dB}$$

Tehdyt oletukset tuovat laskelmaan luonnollisesti huomattavaakin epävarmuutta. Oletus äänenpaineesta laitteen kohdalla on vähintäänkin optimistinen, sillä on epätodennäköistä, että puhuja olisi sattunut puhumaan suoraan kohti Great Seal-tauluun piilotettua mikrofonikalvoa. Äänenpaineen puolittuminen heikentäisi modulaatiosuhdetta 6 dB.

-45 dB suhde summataajuuden ja kantoaallon välillä tarkoittaa noin 1%:n amplitudimodulaatiota, joka on varmastikin ollut havaittavissa. Kuitenkin on otettava huomioon ympäristön salakuuntelua haittaava vaikutus: heijastukset suurlähetystön julkisivusta ja kuunneltavalla kaistalla esiintyvä kohina.

Approksimaatioyhtälö (3) antaa Yagi-Uda antennin 3 dB-keilanleveydeksi on noin 30 astetta. 20 metrin etäisyydeltä pääkeila kattaa siis noin 10 metriä halkaisijaltaan olevan ympyrän, jonka pinta-ala on 85 m^2 . Brookerin ja Gomezin artikkelissa rakennuksen

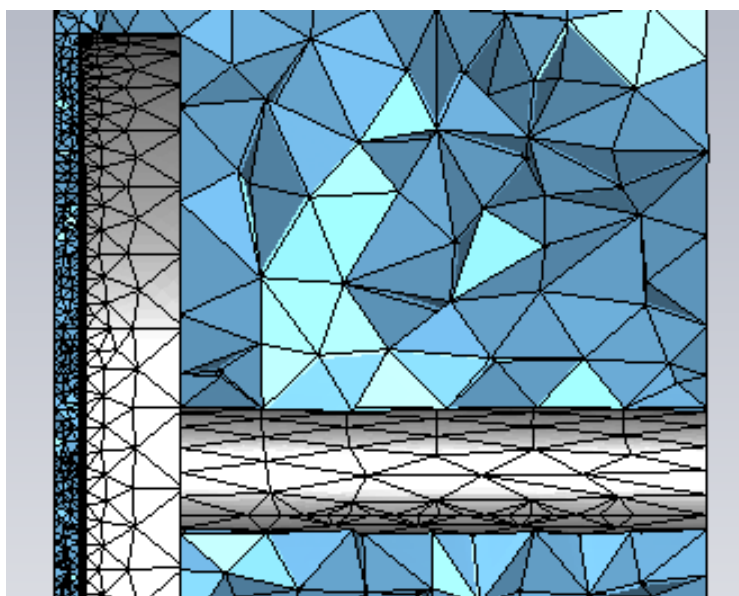
julkisivun tutkapoikkipinta-alaksi rakennuksen pinta-alaa kohden on arvioitu $0,1 \text{ m}^2/\text{m}^2$.
 Julkisivun tutkapoikkipinta-alaksi $\sigma_{rakennus}$ saadaan näin ollen $8,5$ neliömetriä.
 Interferoivan heijastuksen suhteeksi kantaaltoon tulee -54 dB

$$\frac{P_{interferenssi}}{P_t} = \sigma_{rakennus} \left(\frac{G\lambda}{R^2} \right)^2 \left(\frac{1}{4\pi} \right)^3 = -54 \text{ dB}$$

Vastaanottimen herkkyyden on oltava riittävä, jotta moduloitu signaali on mahdollista saada vastaanotossa esiin häiriösignaaliksi laskettavan interferenssin alta. Tosin salakuuntelun kannalta on edullista, että rakennuksesta heijastuva interferoiva signaali pysyy ajan suhteen lähes muuttumattomana.

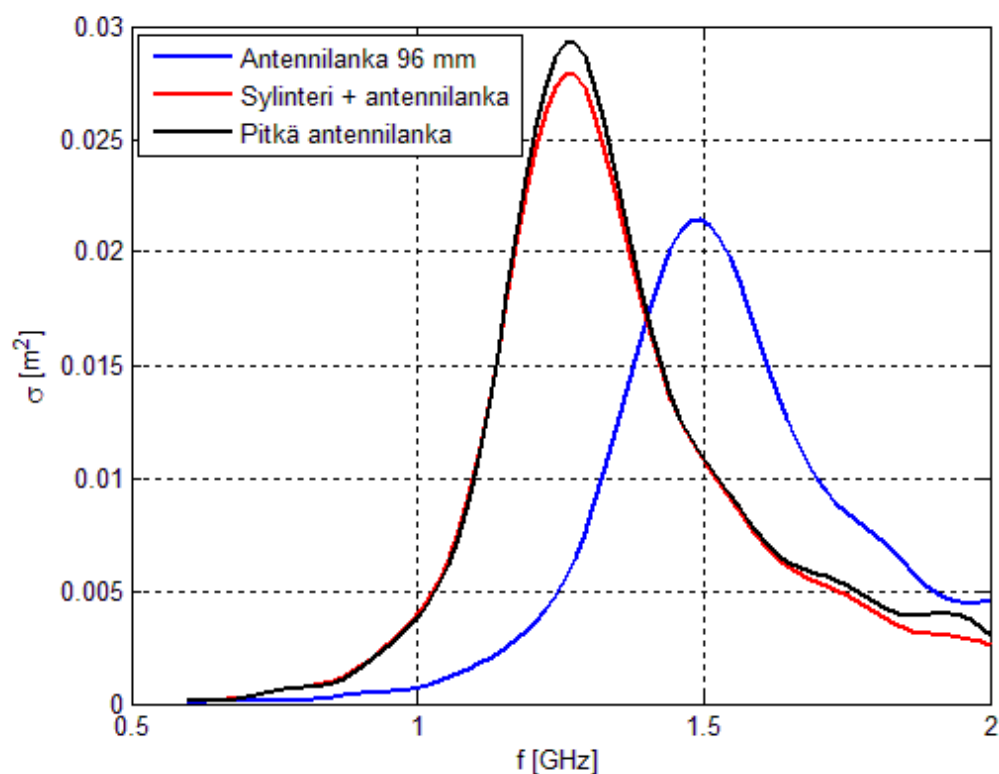
4. Laitteen toiminnan tarkastelu simuloinnein ja laskutoimituksin

Tässä kappaleessa esitellyissä simuloinneissa äänenpaineen aiheuttama kalvon liike on mallinnettu muuttamalla sylinterin korkeutta, tyypillisesti 1 μm . Ratkaisu yksinkertaistaa simulaatiota, mutta antaa jonkin verran liian suuria arvoja tutkapoikkipinta-alan muutoksille. Simulointiohjelmistona on käytetty CST MWS:ta. Tarkka simulaatio pienellä ilmavälillä edellyttää laskentasolutiheyden kasvattamista takaelektrodin ja mikrofonikalvon välissä, kuten esimerkkikuvassa 13 alla on esitetty.



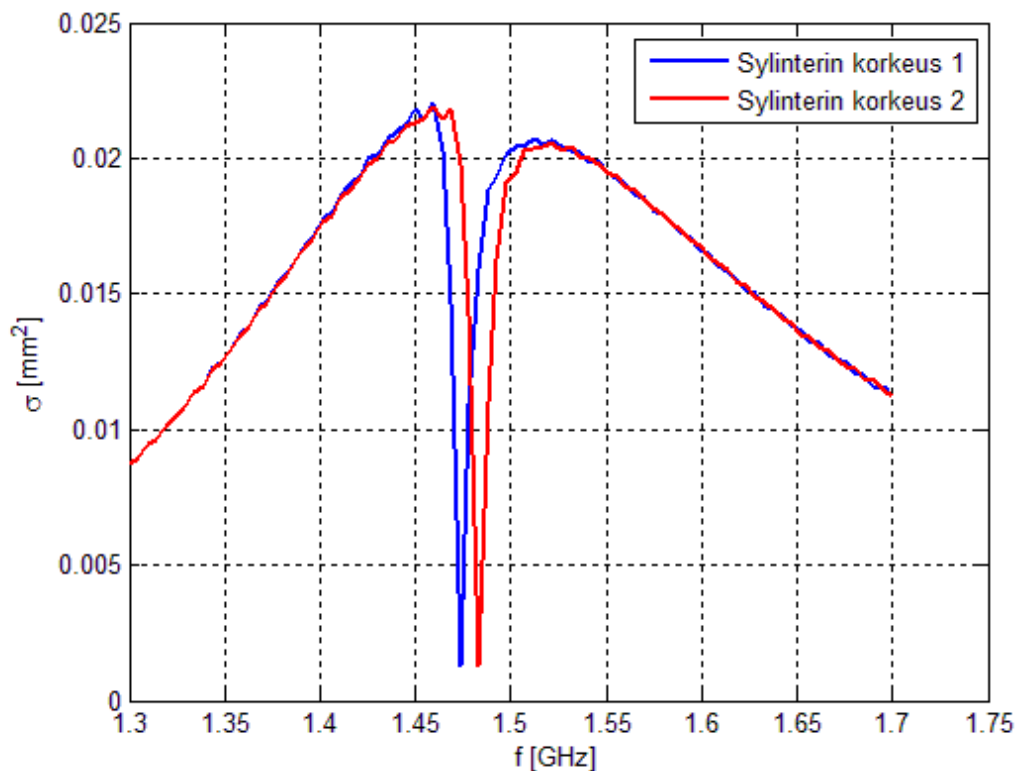
Kuva 13. Mesh-solujen tiheyttä on kasvatettava ilmavälin alueella.

Osoittautuu, että salakuuntelulaitteen makroskooppisen takaisinsironnan määrää kokonaisrakenteen mitta: sylinteriresonaattorin vaikutus on pieni resonanssitaajuutensa ulkopuolella. Asiaa on havainnollistettu kuvan 14 avulla, josta näkyy, että antennilangan päähän lisätty sylinteriresonaattori tuottaa makroskooppisesti kutakuinkin saman tutkapoikkipinta-alan kuin vastaavan pituinen antennilankakin. Kuitenkin kapealla taajuusalueella sylinteriresonaattori määrää takaisinsironnan. Tämä taajuusalue korreloi hyvin voimakkaasti vastaavan umpinaisen sylinterirakenteen alimman resonanssin kanssa. Lopputuloksena on kuvan 15 kaltainen sirontakäyrä, jossa on voimakas paikallinen minimi kutakuinkin sylinterin resonanssitaajuudella.



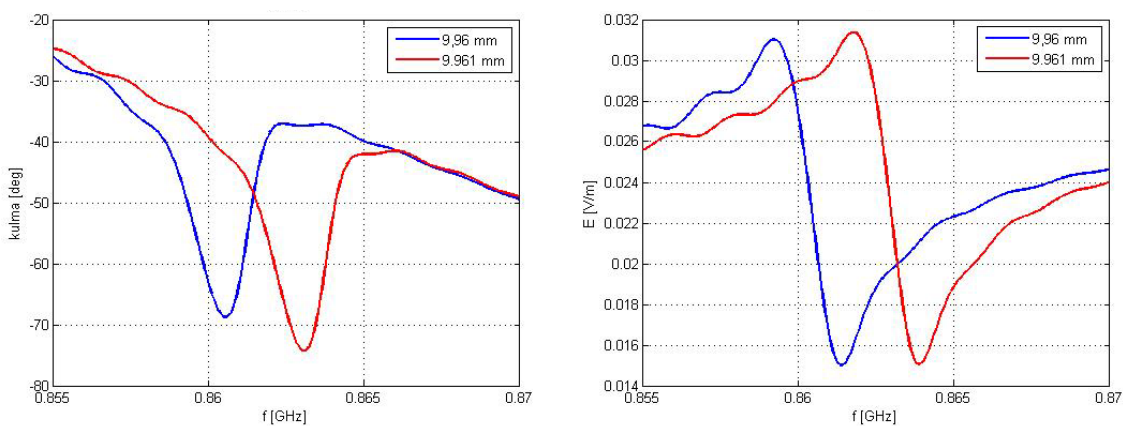
Kuva 14. Simuloitujen tutkapoikkipinta-alojen makroskooppinen määräytyminen antennilangan pituudesta.

Kuvassa 15 on simuloitu erään esimerkkirakenteen tutkapoikkipinta-alaa kahdella eri sylinterin korkeudella. Resonanssitaajuuden ulkopuolella – eli alle 1,46 ja yli 1,52 GHz:n taajuuksilla – käyrien erotus on häviävän pieni, eikä modulaatiota synny. Kuitenkin kapeahkolla välillä resonanssitaajuuden 1,47 GHz ympäristössä tutkapoikkipinta-alan muutos on merkittävä. Tällöin heijastusteho on siis herkin kalvon liikkeelle ja amplitudimodulaatiota syntyy.



Kuva 15. Tutkapoikkipinnan muuttuminen kalvon liikkeen myötä esimerkikirakenteella.

Kuvassa 17 on esitetty sironneen sähkökentän vaihe ja voimakkuus 1 m etäisyydellä salakuuntelulaitteesta. Vaihe muuttuu enimmillään 33 mikroastetta/Hz. Näin ollen on kokonaisvaihemuutos 7,7 nm kalvon liikkeellä ja 20 kHz siirtymällä 0,67 astetta.



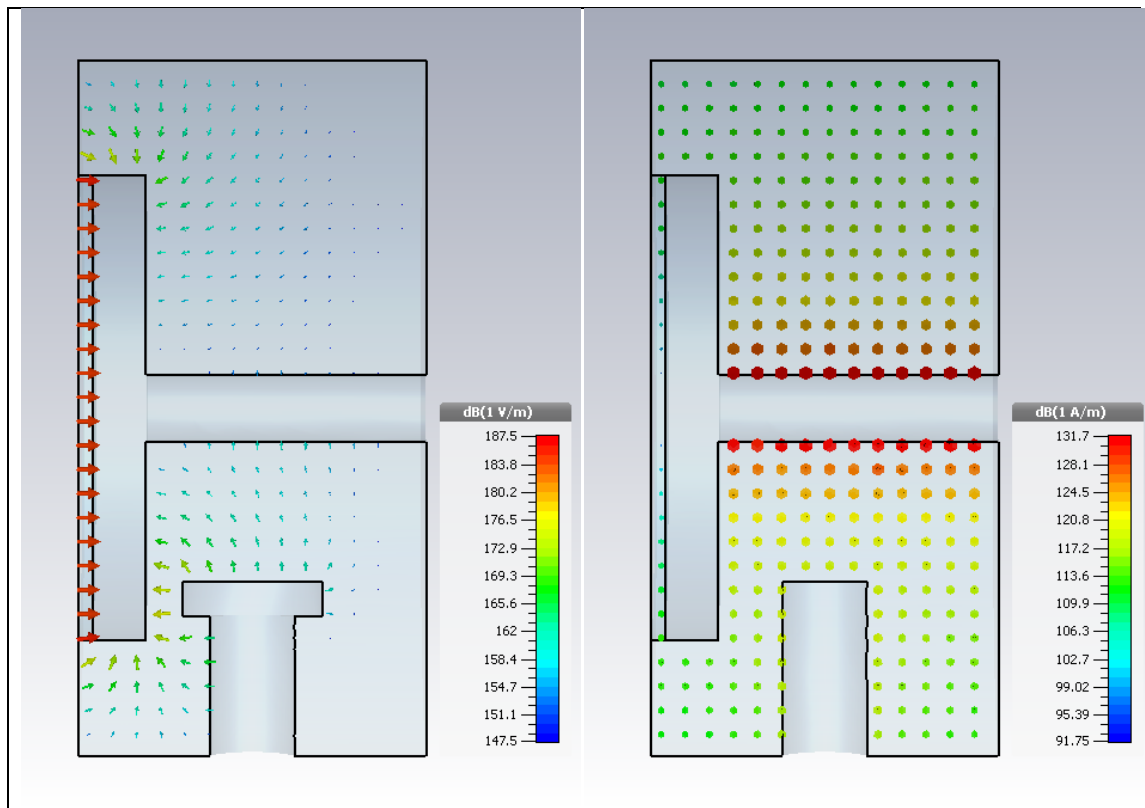
Kuva 17. Sironneen sähkökentän simuloitu vaihekulma ja voimakkuus kahdella eri kalvon asennolla. Mittauspiste on ollut 1 m päässä antennilangasta.

0,67 asteen vaiheen muutos merkitsee vaihemodulaation kerrointa $\beta=0,0117$ rad ja edelleen tehosuhtetta -44,6 dB.

4.1 Kenttien ja virtojen jakautuminen rakenteessa

Kuvassa 18 on esitetty sylinterirakenteen alimman resonanssimuodon sähkö- ja magneettikentän suuntautuneisuus ja suhteellinen voimakkuus. Sähkökentän

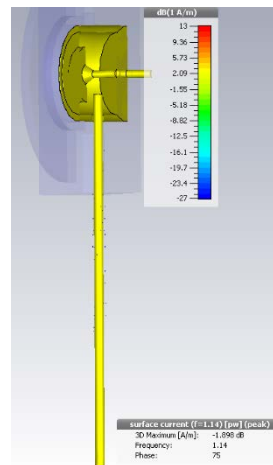
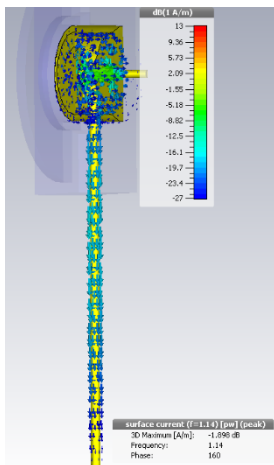
keskittyminen mikrofonikalvon ja takaelektrodin väliin kertoo herkkyydestä niiden välissä olevan ilmapälin koon suhteen. Magneettikenttä kiertää ympäri sylinterin symmetria-akselia ollen voimakkaimmillaan takaelektrodin jalan ympärillä.



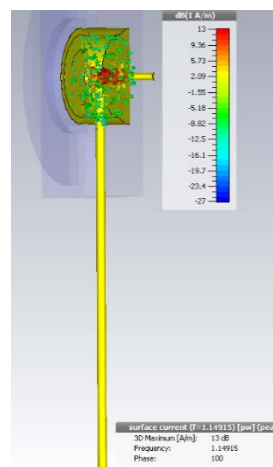
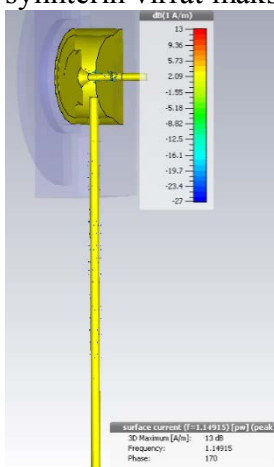
Kuva 18. Sylinterin alimman resonanssimuodon sähkö- ja magneettikentän voimakkuus

Alla kuvassa 19 on havainnoitu rakenteessa esiintyviä virtoja kahdella, toisistaan vain hieman poikkeavalla taajuudella. Taajuudet 1,14 ja 1,149 GHz on valittu siten, että alemmalla taajuudella simuloitu rakenteen tutkapoikkipinta-ala on suurimmillaan; ja paikallisessa minimissään ylemmällä 9 MHz korkeammalla taajuudella. Simuloinnista havaitaan, että laitteen toimiessa tehokkaana takaisinsirottajana sylinterin ja antennilangan virrat ovat samassa vaiheessa. Vain hieman suuremmalla taajuudella vaihe-ero on merkittävästi suurempi.

Kuvan 19 vasemmassa yläkulmassa virrat ovat sekä sylinterissä, että antennilangassa maksimissaan yhtä aikaa. 90 astetta myöhemmin molemmat saavuttavat miniminsä, kuten kuvan oikeasta yläkulmasta ilmenee. Virran käyttäytyessä tällä tavoin laite toimii tehokkaana takaisinsirottajana eli tutkapoikkipinta-ala on suunnilleen maksimissaan. Kuvan vasemmassa alakulmassa antennilangan virta on maksimissaan, mutta sylinterin virta saavuttaa maksiminsa 90 astetta myöhemmin.



1.14 GHz 0 deg. Antennilangan ja 1.14 GHz 90 deg. Molemmat minimissä.
sylinterin virrat maksimeissaan

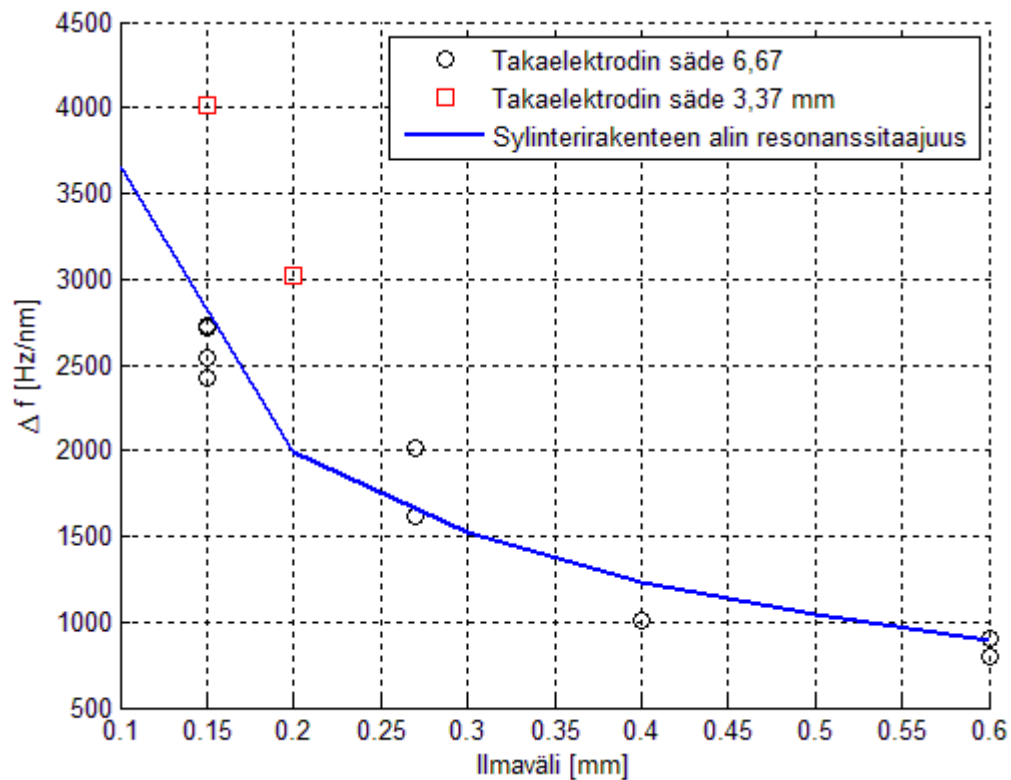


1.149GHz 0 deg. Antennilangan virta 1.149 GHz 90 deg. Sylinterin virta
maksimissaan maksimissaan

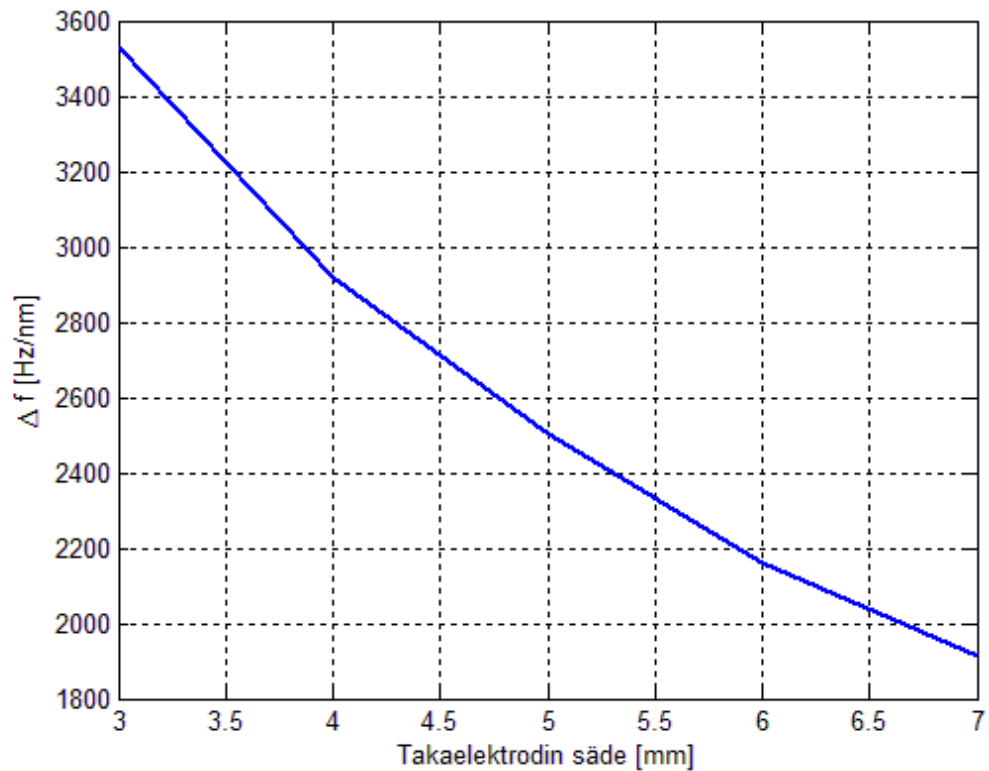
Kuva 19. Virrantiheys rakenteessa eri vaiheissa kahdella eri taajuudella. Vaiheet ovat toisistaan 90 asteen etäisyydellä. Kuvakaappaukset ovat animoiduista simulaatoratkaisuista.

4.2 Mahdollisia keinoja toteutuneen modulaation kasvattamiseksi

Kuvaan 20 on koottu datapisteitä muutamista eri simuloinneista, joissa on selvitetty salakuuntelulaitteen resonanssitaajuuden muutosta eri ilmaväleihin. Muutos on ilmoitettu Hertseinä kalvon liikkumaa nanometriä kohti. Simulointien välillä on muunneltu antennilangan pituutta siten, että sen ensimmäinen resonanssi on osunut kutakuinkin yhteen onteloresonaattorin resonanssin kanssa. Samalla ilmavälillä esiintyvä hajonta tulosten välillä johtuu siitä, että antennilangan pituus vaihtelee eri simulointien välillä. Pisteistä nähdään, että laitteen herkkyys putoaa voimakkaasti ilmavälin kaksinkertaistuessaa 0,1 mm:stä 0,2 mm:iin ja maltillisemmin näitä suuremmilla ilmaväleillä. Mahdollisimman pieni ilmaväli on siis toiminnan kannalta suotavaa. Kuvasta nähdään myös, että salakuuntelulaitteen resonanssitaajuuden muutos määräytyy käytännössä kokonaan onteloresonaattorin resonanssitaajuuden muutoksesta. Sininen, yhtenäinen käyrä kuvaa hyvin datapisteiden sijoittumista.



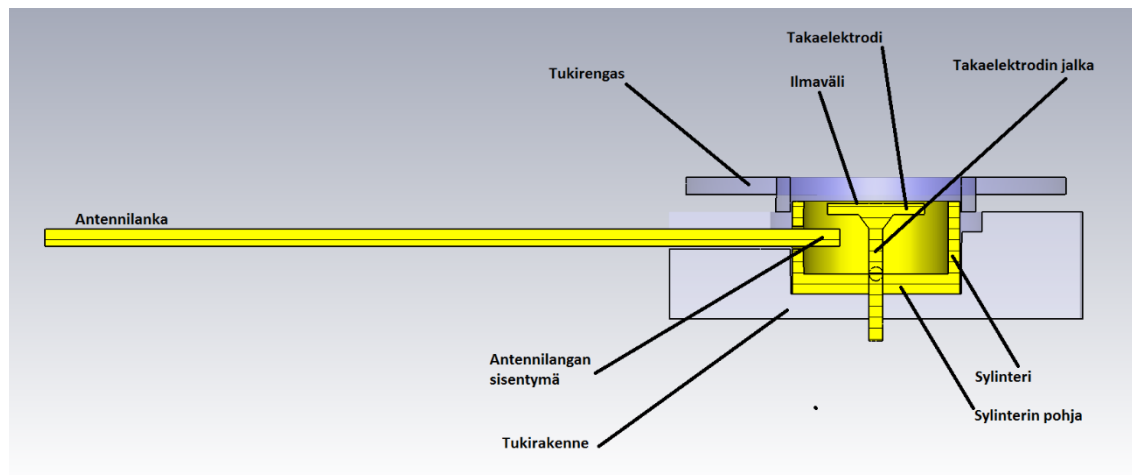
Kuva 20. Ilmavälin vaikutus salakuuntelulaitteen resonanssitaajuuden muutoksen suuruuteen. Kuvaan on koottu datapisteitä useista eri simuloinneista, joissa on varioitu ilmavälin ohella simulointitarkkuutta. Muutos on ilmoitettu Hertzeinä yhtä kalvon liikkumaa nanometriä kohti. Sininen, yhtenäinen viiva kuvaa pelkän sylinterirakenteen simuloitua resonanssitaajuuden muutosta. Kuvaan on punaisiin neliöihin merkitty myös pienemmällä takaelektrodin säteellä simuloitua arvoja.



Kuva 21. Takaelektrodin säteen vaikutus salakuuntelulaitteen resonanssitaajuuden muutoksen suuruuteen nanometriä kohden.

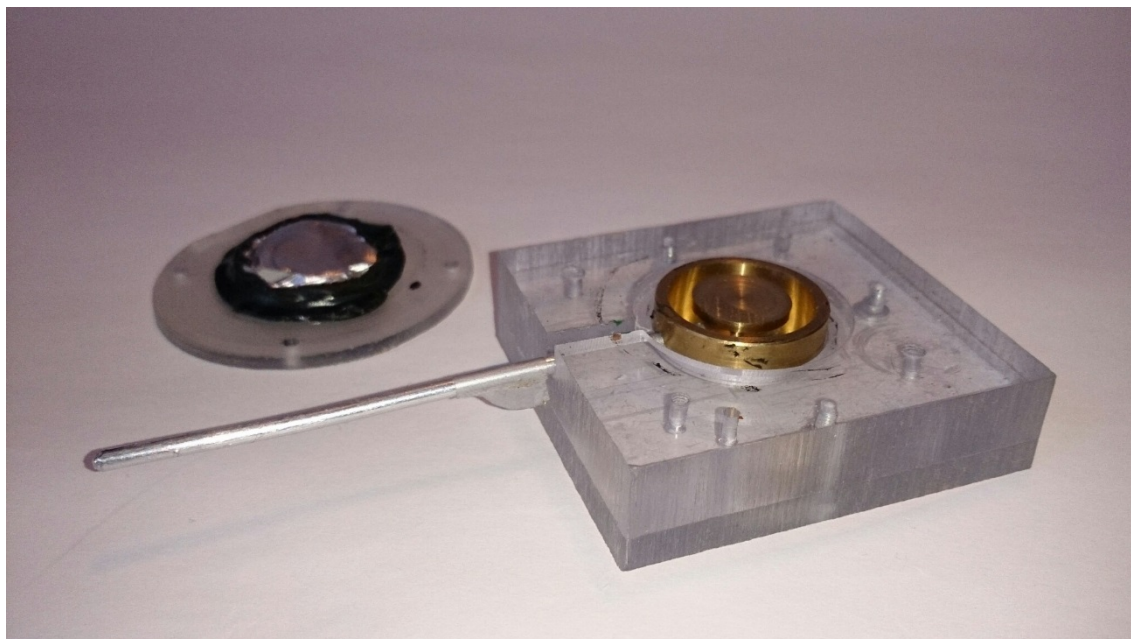
Sylinterin resonanssitaajuus määrää taajuusalueen, jolla mahdollinen modulaatio on suurimmillaan, mutta antennilangan valinnalla on mahdollista vaikuttaa sen sijaintiin suhteessa $\lambda/2$ -kohdan maksimiin. Eri konfiguraatiot tuottavat ainakin hieman toisistaan poikkeavat kulmakertoimet.

5. Laitteen rakentaminen ja mittausjärjestelyn kuvaus



Kuva 22. Laitteen ympärille suunniteltiin tukirakenne, joka asemoi antennilangan paikalleen ja kiristää mikrofonikalvon.

Laitteen rakentaminen aloitettiin Radiotieteen ja –tekniikan laitoksen pajalla sylinteripalan valinnalla. Hyllystä löytyneestä, valmiiksi sopivan kokoisesta messinkitangosta koverrettiin metallisorvilla sisähalkaisijaltaan 19,96 mm ja sisäkorkeudeltaan 9,96 mm sylinteri. Takaelektrodi jalkoineen sorvattiin messingistä ja jalkaan lisättiin ruuvikierre resonanssitaajuuden säätämistä varten. Vastaava kierre toteutettiin sylinterin pohjan keskelle porattuun reikään. Resonanssitaajuuden säätö otettiin huomioon jättämällä takaelektrodin jalka reilusti ylipitkäksi sylinterin korkeuteen nähden. Takaelektrodin säteeksi hyväksyttiin valmiin messinkitangon 6,67 mm. Takaelektrodin jalka pyrittiin sorvaamaan mahdollisimman kapeaksi; toteutunut 0,96 mm valittiin sorvaajan taidon sanelemana. Antennilangan ujuttamista varten sylinterin kylkeen porattiin säteeltään 1,54 mm säteinen reikä tarkasti sisäkorkeuden puoliväliin. Tukirakenteen, jonka osat on selitetty kuvassa 22, on suotavaa olla antennilangan suunnassa pieni verrattuna resonanssiaallonpituuteen: näin resonanssi-ilmiötä häiritään mahdollisimman vähän. Tukirakenteen on toimittava mikrofonikalvon ja antennin kiinnitysalustana. Sen on mahdollistettava paitsi takaelektrodin korkeuden säätö, myös kalvon jännityksen lisääminen. Koska tukirakennemateriaalin permittiivisyys väistämättä poikkeaa ilman permittiivisyydestä, on rakenteen vaikutus sirontaan otettava huomioon suunnittelussa. Dielektrisen kappaleen läheisyys vaikuttaa paitsi laitteen resonanssitaajuuteen, myös toteutuvan modulaation suuruuteen. Tukirakenteeksi valittiin läpinäkyvää muovia, johon jyrsittiin kolo ja ura sylinterille ja antennilangalle.



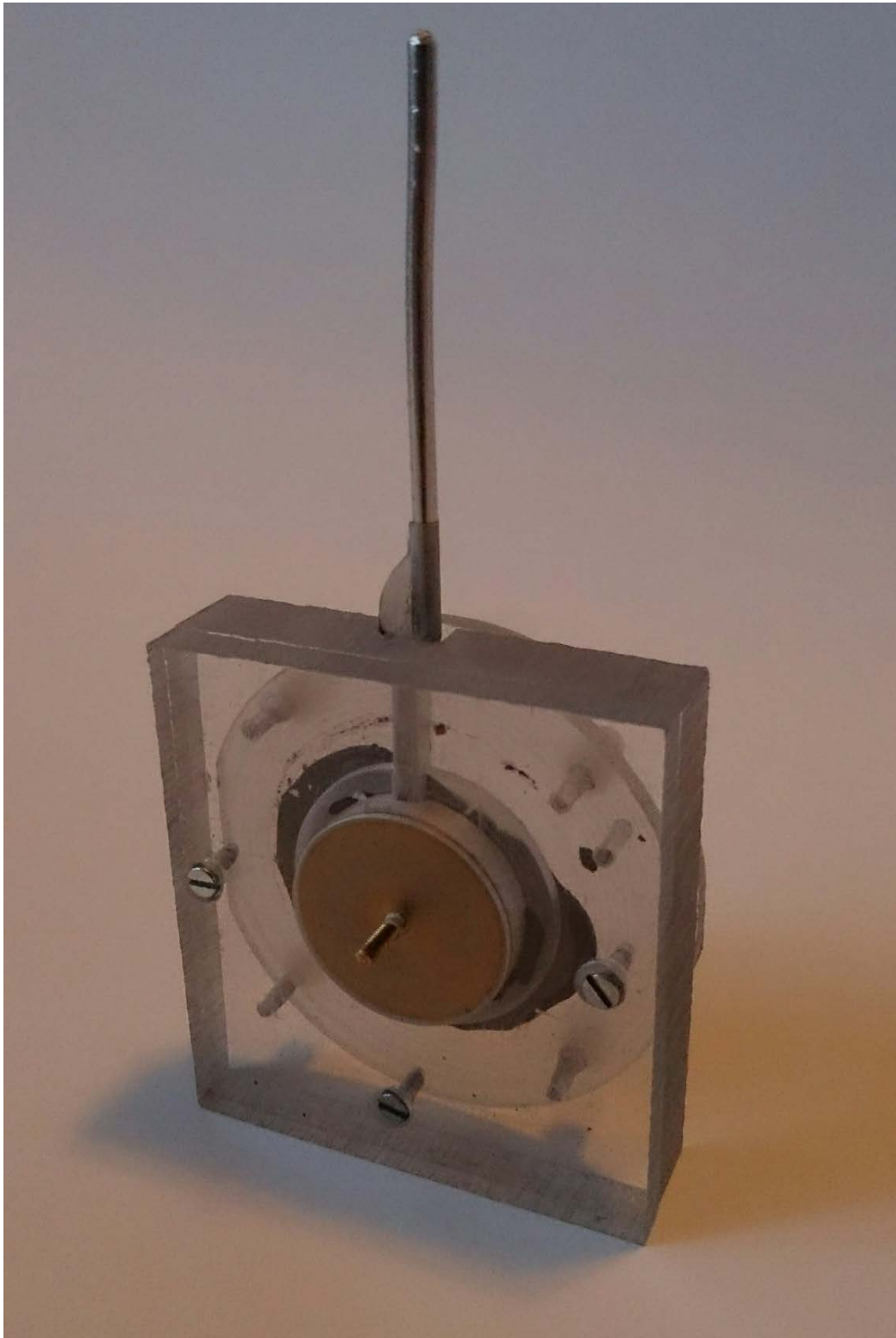
Kuva 23. Valmis laite avattuna. Muovinen tukirengas on käännetty nurin ja musta kumiteippirengas on nähtävissä. Kumiteippirengaan keskellä pilkistää alumiinifolion takaelektrodin vastainen puoli.

Antennilankoja leikattiin alumiinitangosta pari kappaletta eripituisiksi ja niiden ympärille sylinteripäätyyn käärittiin ohut kerros askarteluteippiä galvaanisen kosketuksen estämiseksi. Jotta antennilangan vaihto onnistuisi avaamatta koko rakennelmaa, jätettiin antennilangan päädyistä pois pieni kytkentälaute. Mikrofonikalvoksi sopi alumiinifolio, joka leikattiin ympyrän muotoiseksi, sylinterin ulkosäteeseen nähden muutama milli ylisuureksi, ja johon kiinnitettiin kumiteippirengas kuvan 23 havainnollistamalla tavalla. Kumiteippirengaan tehtävänä oli tuottaa riittävästi kitkaa kalvoa kiristettäessä sylinterin suulle. Muovisen tukirengaan avulla mikrofonikalvo painettiin sylinterin reunoihin kiinni siten, että kumiteippirengas jäi mikrofonikalvon ja tukirakenteen väliin puristuksiin. Kalvoa kiristäviä ruuveja säädettiin tasaisesti kunnes viimeisetkin juomut silisivät alumiinifolion pinnalta.

Toteutuneen takaelektrodin jalan ruuvikierteen havaittiin muuttavan ilmaväliä noin 0,4 mm/kierros.

Taulukko 2: Toteutuneen rakenteen mitat. Kaikki lukuarvot ovat millimetrejä.

Antennilanka				
Pituus	Sisentymä	Säde		
96	5	1,26		
Sylinteri				
Sisäkorkeus	Ulkosäde	Sisäsäde	Antennireiän säde	Pohjan paksuus
9,96	11,56	9,98	1,54	2,79
Takaelektrodi				
Jalan säde	Paksuus	Säde	Jalan korkeus	Kotelon pohjan paksuus
0,96	1,53	6,67	20	2
Tukirakenne				
Leveys	Korkeus	Syvyys	Sylinterikuopan syvyys	
52,4	56,9	14,7	10	
Tukirengas				
Renkaan paksuus	Renkaan sisäsäde	Renkaan ulkosäde	Korotuksen korkeus	
2,4	14	20	2	



Kuva 24. Valmis salakuuntelulaite kotelointeen

5.1 Valmiin laitteen epäideaalisuudet

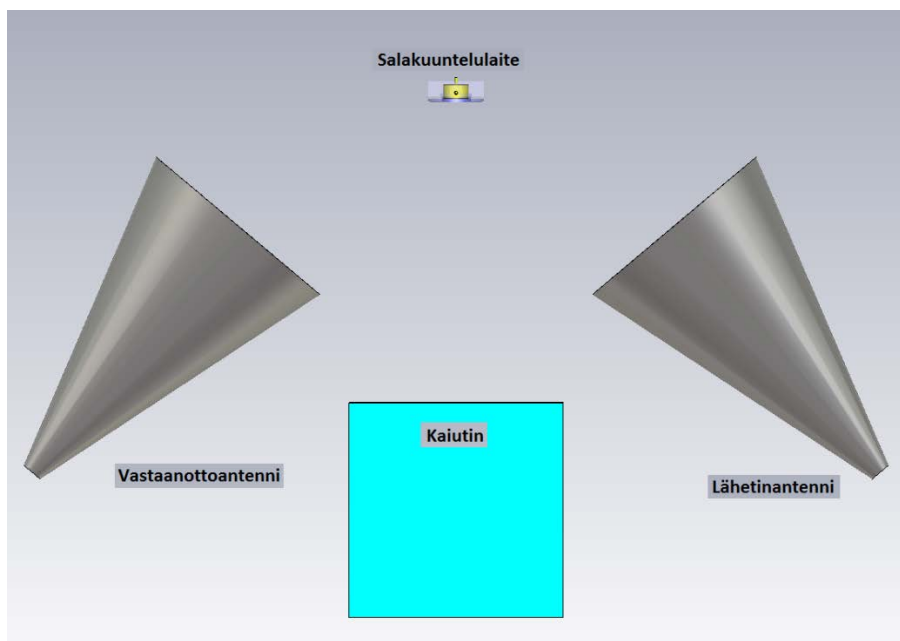
Ihanteellisessa tapauksessa takaelektrodi ja mikrofonikalvo ovat yhdensuuntaiset. Yhdensuuntaisten tasojen välinen ilmaräily on mahdollista supistaa erittäin pieneksi. Kuitenkin toteutunut takaelektrodi muodostaa pienen, mutta selvästi havaittavan kulman mikrofonikalvoon nähden, mikä vaikuttaa laitteen toimintaan ja säädettävyyteen. Kulma johtuu takaelektrodin jalan sorvauksen loppuvaiheilla syntyneestä vääryydestä ja ruuvikierteisiin kiinnityksen väljyydestä suhteessa sylinteriin. Takaelektrodin hienoisella pyöristämisellä kuperaaksi olisi tarkkuuden tarvetta vähentävä vaikutus. Samoin paksumpi sylinterin pohja tuottaisi tukipinta-alaa pidemmälle matkalle, jolloin väljyyden sallima asennon vaihtelu vähenisi. Varmuuden vuoksi ennen väärijalkaisen takaelektrodin hyväksymistä, takaelektrodin ja kalvon välisen kulman riippuvuutta simuloitiin vinouttamalla takaelektrodia jalkoineen 1 aste kiinnityskohdalla. Vaikutus ei simulaation perusteella ole ratkaiseva modulaation suuruuden kannalta, mutta resonanssitaajuuteen sillä on vaikutus.

Takaelektrodin jalan ja sylinterin pohjan ruuvikierteisen reiän liitoksen löysyydellä on mahdollisesti toinenkin seuraus: laite ei pysyne stabiilissa toimintatilassa, mikäli siihen tartutaan. Tällöin resonanssitaajuuden säätö ilmaräilyn suuruutta muuttamalla hankaloituu. Pahimmillaan on jopa mahdollista, että takaelektrodi tukeutuu ainoastaan muovikoteloon ja galvaaninen kontakti metalliosien välillä katkeaa.

Alumiinifolion kiinnitykseen käytetty kumiteippi ei liene paras mahdollinen ratkaisu, sillä takaelektrodin hipaistessa kalvoa tai sormen kosketuksen vaikutuksesta kalvo löystyy kerta kerralta. Jännitys katoaa kalvosta ajan myötä ilman ulkoista ärsykettäkin, sillä valittu teippi oli hyvin elastista. Jokainen jälleenkiristys jättää mikrofonikalvoon silottamattomia juomuja.

Takaelektrodin jalan säätöpäästä uupuu jonkinlainen kulmikas säätönuppi. Nyt etenkin kalvon ollessa kireällä vaatii takaelektrodin säätö sormilta voimaa, mikä tekee toteutuneen kiertymän arvioimisen hyvin epätarkaksi. Ilmiö paljastaa, että takaelektrodi tukeutuu muovikoteloon ja sylinteri takaelektrodin jalkaan: sylinteri ei siis tukeudu ainoastaan koteloon jyrksityn kuopan pohjalle.

5.2 Modulaatiotehon mittaus



Kuva 25. Kaaviokuva kahden antennin, kaiuttimen ja salakuuntelulaitteen asemoinnista toisiinsa nähden mittausten aikana. Kuvan katselukulma on ylhäältä.

Tässä kappaleessa kuvataan valmiin laitteen resonanssitaajuuden etsintä ja äänenpaineen aiheuttaman amplitudimodulaation mittaus. Mittauksessa käytetään spektrianalysaattoria, signaaligeneraattoria ja kahta mittausantennia. Sekä lähetyksessä, että vastaanotossa antennina toimii ETS-Lindgrenin malli 3164-08, jonka vahvistus on valmistajan tuotesitteen mukaan 8 dBi 1 GHz:n ympäristössä [29]. Viimeisessä mittauksessa on VNA:lla ja yhdellä antennilla heijastuskertoimen muuttumista ilmapälin pienentyessä. Näin on yritetty selvittää mahdollisuutta löytää laitteen toimintapiste.

Taulukko 3. Mittauksessa tarvittavien laitteiden mallit

Mittausväline	Malli
Kaiutin	Genelec 1032B Aktiivinen 2-tiekaiutin
Antennit	ETS-Lindgren 3164-08
Spektrianalysaattori	HP
VNA	Agilent
Signaaligeneraattori	Rohdes&Schwartz SMR60

Koska valmiin salakuuntelulaitteen takaelektrodin etäisyys mikrofoni- ja mikrofonikalvosta on hankala määrittää tarkasti, on takaelektrodi säädettävä asemaansa siten, että ensin se kiristetään juuri ja juuri hipaisemaan kalvoa. Kalvon ja takaelektrodin lautasen hangatessa syntyy rahisevaa ääntä, mikä on kuultavissa silmin nähtävää kalvon taipumista aiemmin. Tämä lähtöasetelma mahdollistaa ilmapälin asettamisen karkeasti halutun suuruiseksi. Sormin tapahtuva säädön tarkkuus on neljäsosakierroksen luokkaa eli noin 0,1 mm.

Äänenpaineen aiheuttamaa amplitudi- ja vaihemodulaatiota laitteesta heijastuneeseen tehoon tutkitaan spektrianalysaattorilla, jolla mitataan summataajuudella f_{USB} esiintyvä

teho ja sen suhde kantaallon taajuudella f_C esiintyvään tehoon. Kantataajuinen teho kytketään signaaligeneraattorista lähetinantenniin. Vastaanottoon saapuva teho muodostuu neljästä tekijästä

1. Suora yhteys lähetin- ja vastaanottoantennien äärellisestä isolaatiosta johtuen
2. Erinäisten seinä- ja tukirakenneheijastusten kautta saapuva teho
3. Salakuuntelulaitteesta siroava moduloitunut teho
4. Kohina

Toimintapisteen löytämiseksi käytetään 123 Hz:n siniääntä ja mitataan summataajuudella $f_{USB} = f_C + 123 \text{ Hz}$ esiintyvä teho P_{USB} . Kantaallon taajuutta on muutettava riittävän pienin hyppäyksin, jotta kapea toimintapiste olisi löydettävissä. Toimintapiste on leveydeltään ainoastaan parinkymmenen megahertsin luokkaa, mikä näkyy simulointituloksissa, esimerkiksi kuvassa 15. Takaelektrodi on asetettu kuvaillulla tavalla ensin kiinni kalvoon ja sitten noin neljäsosakierros poispäin mahdollisimman pienen ilmavälin luomiseksi.

Toimintapisteen löydyttyä asetetaan kantaallon taajuus vakioksi ja varioidaan moduloivan äänen taajuutta f_{MOD} salakuuntelulaitteen taajuusvasteen selvittämiseksi. Mittaustulokset on esitetty kappaleessa 7.

5.3 Toimintapisteen karkea etsintä S_{11} :n avulla

Lisäksi tutkitaan mahdollisuutta määrittää salakuuntelulaitteen toimintapiste karkeasti mittaussantennin heijastuskertoimen avulla. Aluksi takaelektrodi kierretään edellisestä mittauksesta poiketen vastakkaiseen ääriasentoonsa: lähes kiinni antennilankaan. Salakuuntelulaitte, jonka resonanssitaajuus on täten verrattain korkealla, asetetaan mittaussantennin eteen arviolta parinkymmenen senttimetrin päähän etureunasta ja tarkastellaan VNA:lla S_{11} :n käyttäytymistä. Mittaus on kolmivaiheinen:

1. Ensimmäinen mittaustulos asetetaan vertailupisteeksi, jolloin heijastus S_{11} muodostaa taajuusalueessa suoran viivan.
2. Takaelektrodia säädetään kutakuinkin $\frac{1}{4}$ -kierros kohti alumiinikalvoa.
3. Kirjataan taajuus, jonne on ilmaantunut negatiivinen tai positiivinen piikki.

Vaiheita 2 ja 3 toistetaan, kunnes takaelektrodi koskettaa kalvoa tai kunnes haluttu toimintapiste on löytynyt. Taajuusalueen yläpäähän jäänee ylimääräinen piikki johtuen lähtötilanteesta, jossa takaelektrodi oli lähellä antennilankaa. Alemmalle taajuudelle ilmaantunut piikki on laitteen karkea toimintapiste.

5.4 Tutkapoikkipinta-alan mittaus S_{11} :n avulla

Nikitiinin ja Raon artikkeliin [17] perustuen mitataan VNA:lla ensin $S_{11,huone}$ mittaustilassa ilman salakuuntelulaitetta ja tämän jälkeen toistetaan mittaus salakuuntelulaitteen kanssa.

$$S_{11} = \frac{S_{11,LAITE}}{S_{11,HUONE}}$$

Heijastuskertoimen itseisarvon neliön, lähetetyn ja vastaanotetun tehon välillä on likimain voimassa yhteys

$$|S_{11}|^2 \approx \frac{P_r}{P_t}.$$

Tutkayhtälön (27) avulla voidaan näin ollen laskea tutkapoikkipinta-ala σ .

6. Mittaustulokset

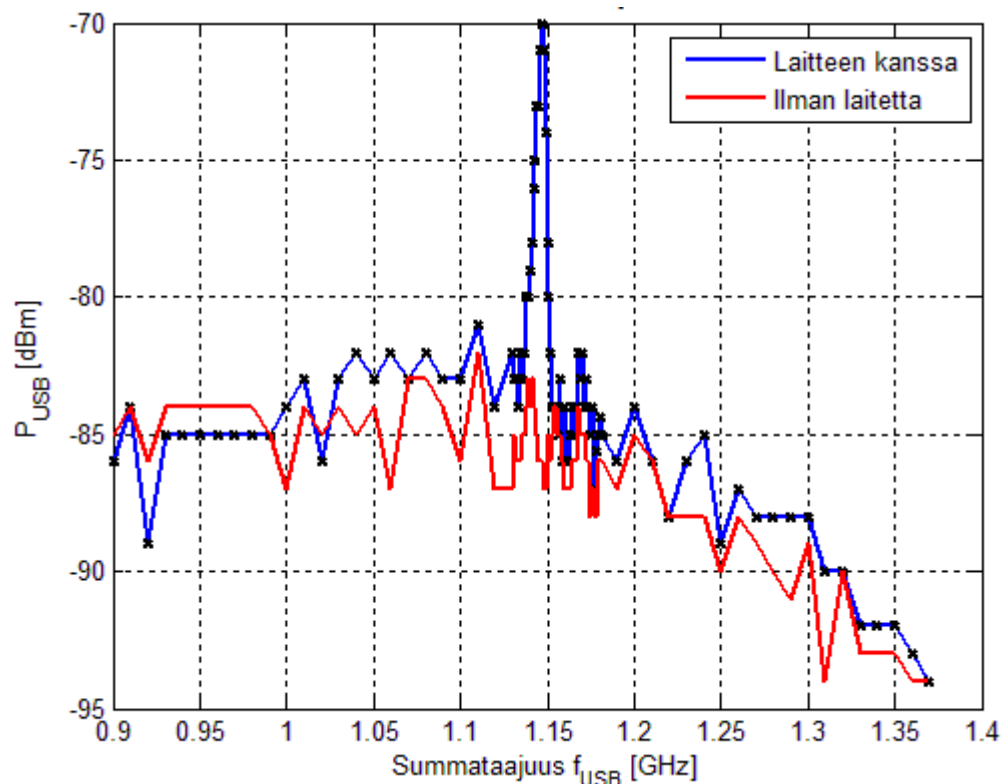
Toteutetun laitteen käyttäytymistä amplitudi- ja vaihemoduloivana heijastajana tutkittiin RAD-laitoksen suuremmassa radiokaiuttomassa huoneessa. Mittausjärjestely oli kappaleessa 6 kuvaillun mukainen. Ensimmäinen yritys mitata saman laitoksen pienemmässä radiokaiuttomassa huoneessa epäonnistui, mille on muutamia mahdollisia syitä. Pienessä huoneessa yritetyn mittauksen aluksi huomattiin toteutuneen modulaation olevan hyvin voimakasta ilman salakuuntelulaitettakin. Jotta kaiuttimen mahdollinen rooli moduloivana sirottajana tuli eliminoiduksi, kokeiltiin muovista klarinettia äänilähteenä. Ratkaisu vähentäisi myös signaalin sähköistä kytkeytymistä kaapeleiden ja maatason kautta. Kuitenkaan klarinetillakaan ei löytynyt kantoaaltotaajuutta, jolla toteutuva modulaatio olisi salakuuntelulaitteen kanssa voimakkaampaa kuin ilman laitetta. Klarinetin soittaminen signaaligeneraattorin välittömässä läheisyydessä tuotti hyvin voimakkaan modulaatiotehon summataajuudelle, joten pienemmän radiokaiuttoman huoneen alhaisen ääneneristystason voidaan katsoa olleen pääsyy mittausten epäonnistumiselle.

Isommassa radiokaiuttomassa huoneessa äänieristys signaaligeneraattorin ja kaiuttimen välillä oli huomattava, mikä mahdollisti kipukynnyksen ylittävän äänenpainetason ja toimintapisteen hienovaraisemman etsinnän. Klarinetin kanssa mittaajan oli nimittäin kuljettava edestakaisin kahden huoneen välillä, mikä todennäköisesti vähensi tarvittavaa malttia etsiä toimintapistettä tarpeeksi pienin taajuusaskelin.

Koska mittaukset oli tarkoitettu ainoastaan varmistamaan laitteen toiminta, ei todellista äänenpainetta ole mitattu laitteen kohdalla. Näin ollen vertailtaessa mittaustuloksia simulaatioiden kanssa on äänenpaineeksi oletettu 2 Pa, ihmisen kipukynnyksen verran. Mittaustuloksissa on huomioitu kaapeleiden aiheuttama vaimennus, joka on pituuden perusteella arvioitu 2 desibeliksi.

6.1 Toimintapisteen etsintä summataajuuden avulla

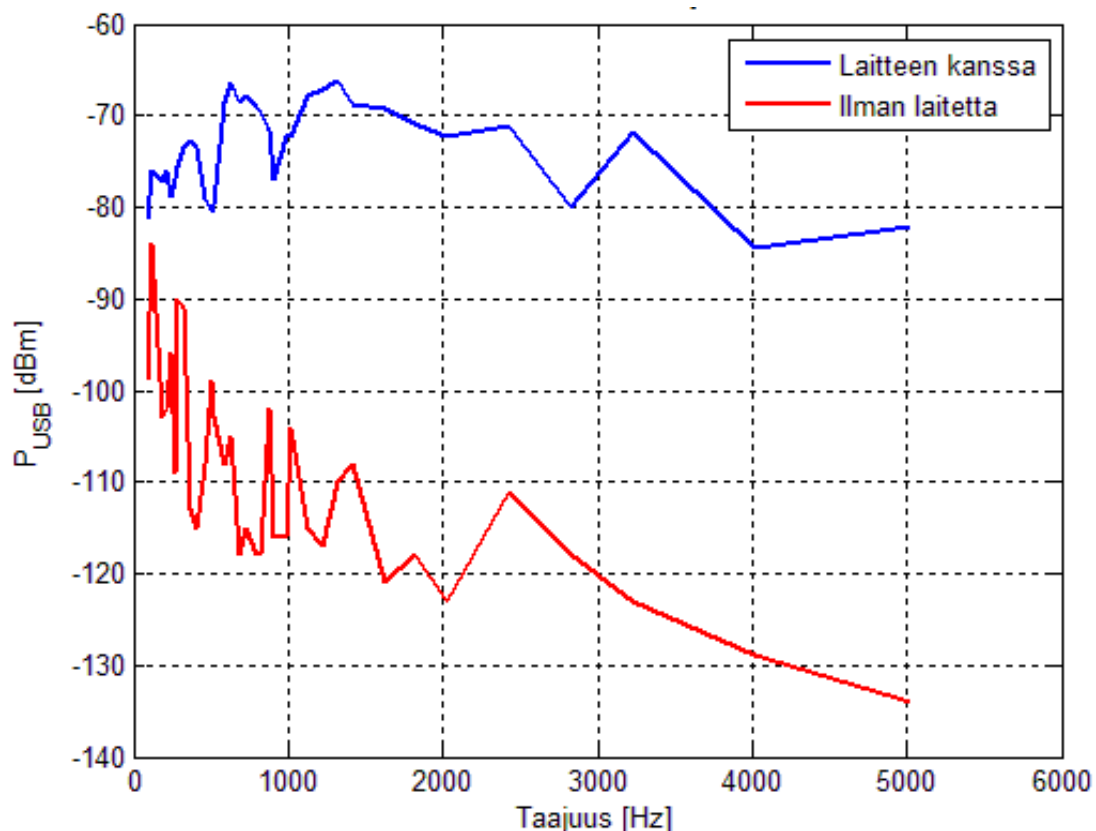
Kuvassa 26 on esitetty summataajuudella mitattu teho. Laitteen toimintapisteen 1,147 GHz kohdalla näkyvä piikki erottuu selvästi ympäristöstään yli 12 dB:n erolla. Piikki on havaittavissa vain alle 12 MHz levyisellä alueella, mikä selittää aiemman epäonnistuneen klarinettimittauksen. Mittauspisteitä on välillä 1,13-1,182 GHz tiheämmin kuin mitatun taajuusalueen ääripäissä: tarkennetulla alueella mittauspisteiden väli on 1 MHz 10 MHz:n asemesta. Käyrien rippeli johtuu interferenssin ja kohinan vaikutuksesta mittauksen tarkkuuteen: alhaisimmilla tehotasoilla olisi tarkempi mittaustulos edellyttänyt usean näytteen keskiarvoistamista. Silti mittauksen kannalta oleellisen tiedon eli toimintapisteen löytämiseksi tarkkuus oli riittävä.



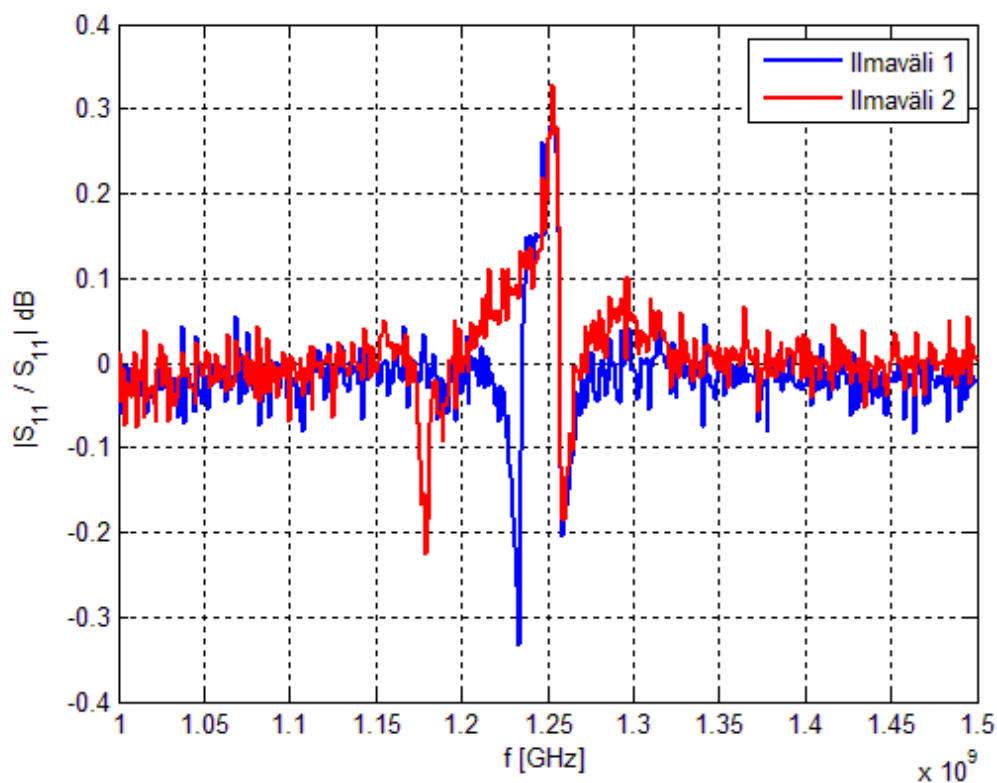
Kuva 26. Summataajuudella vastaanotettu teho lähetystaajuuden funktiona. Moduloivana signaalina on käytetty 123 Hz sinisignaalia.

6.2 Summataajuudella esiintyvän tehon riippuvuus moduloivasta äänitaajuudesta

Kuvassa 27 on esitetty summataajuuden teho moduloivan äänitaajuuden funktiona. Kantoaallon taajuus on edellisessä mittauksessa (kuva 26) löytynyt 1,147 GHz. Mittauksen perusteella salakuuntelulaite on herkimmillään kahdella taajuuskaistalla: väleillä 600–800 Hz ja 1100–1400 Hz. Herkimmän alueen yläpuolella vaste laskee noin 6 dB/kHz. Kuvan vasemmanpuoleisesta osasta on havaittavissa myös matalien äänitaajuuksien kytkeytyminen mittauslaitteistoon ilman salakuuntelulaitetta. Ilman laitetta tapahtuva modulaation voimakkuus laskee kasvavan äänitaajuuden myötä noin 8 dB/kHz. Salakuuntelulaitteen äänitaajuusvasteeseen vaikuttaa kalvon kireys, mutta tässä yhteydessä ei ole tutkittu mahdollisuutta siirtää parasta vastealuetta 1 kHz:n ympäristöstä.



Kuva 27. Summataajuudella vastaanotettu teho modulointitaajuuden funktiona. Kanta-aallon taajuus f_c on 1,147 GHz.

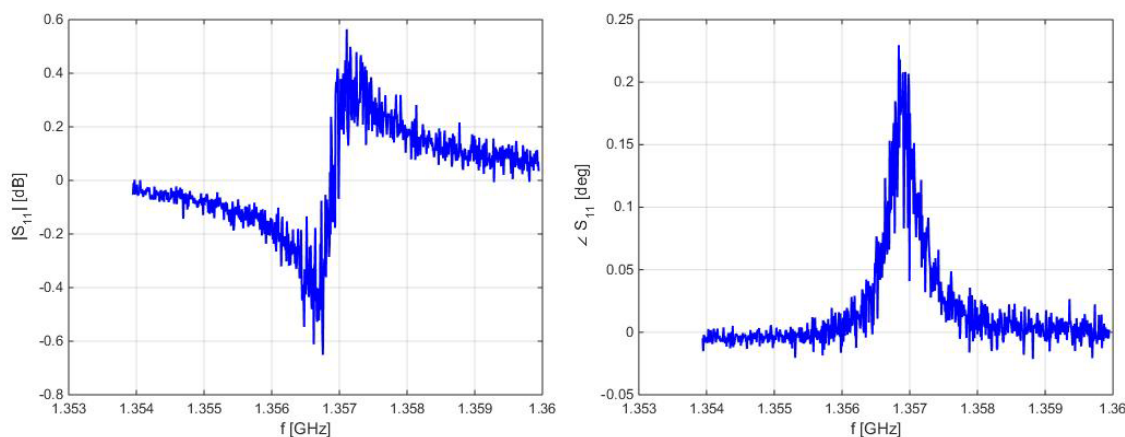


Kuva 28. Heijastuskertoimen suhteellinen muutos. Alkutilanne on asetettu vertailutasoksi 0 dB. Tämän jälkeen ilmaväliä on pienennetty ja sininen käyrä tuo esiin vanhan ja uuden toimintapisteen. Uusi ilmavälin pienennys laskee toimintapistettä edelleen (punainen käyrä).

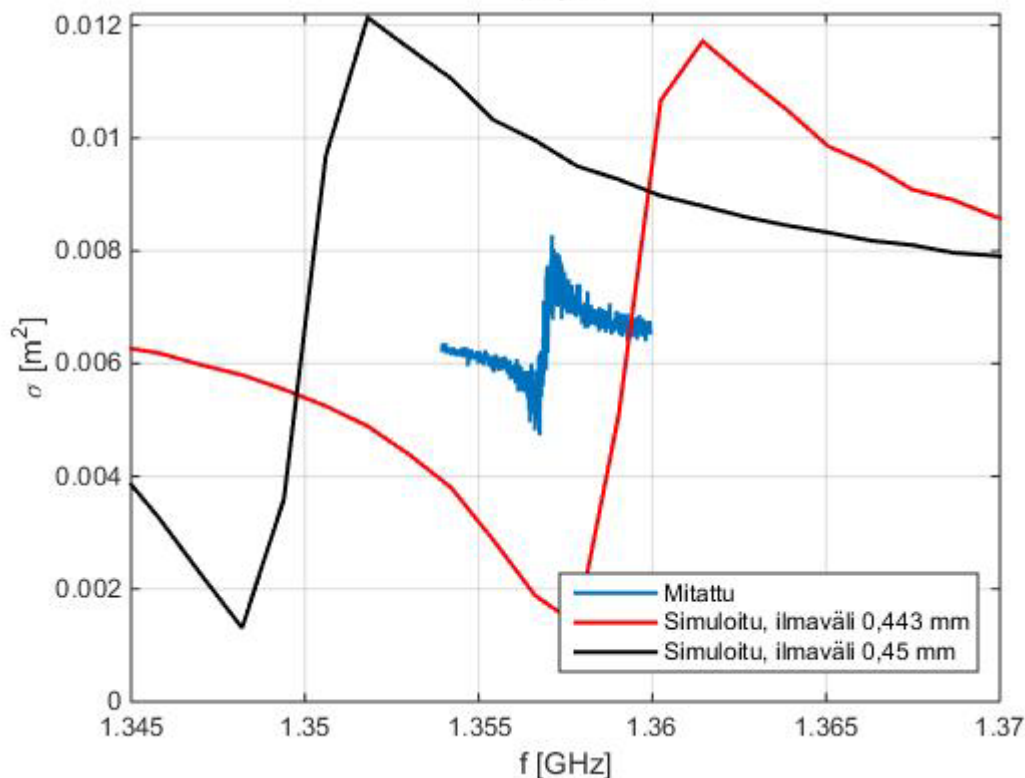
Kuvassa 28 on esitetty heijastuskertoimen muutokseen perustuva toimintapisteen etsintä. Ensin laite on ollut tuntemattomassa toimintapisteessä. Mitattu mittaussantennin S_{11} yhdessä salakuuntelulaitteen kanssa on asetettu referenssisitasoksi 0 dB. Tämän jälkeen ilmaväliä on pienennetty noin neljäsosakierros, mikä näkyy kuvassa sinisellä piirrettynä kaksoispiikkinä. Piikin kaksi huippua paljastavat, että alkuperäinen toimintapiste on ollut 1,25 GHz ja uusi toimintapiste 1,23 GHz. Uusi ilmavälin pienennys laskee toimintapistettä edelleen 1,18 GHz:iin (punainen käyrä).

Heijastuskertoimeen ilmaantuneet muutokset eivät kuitenkaan olleet aina johdonmukaisesti havaittavissa, minkä takia kyseistä mittausten menetelmää tulee pitää epäluotettavana. Osasyys epäjohdonmukaisuuteen on ilmavälin muutoksen vaikea arviointi ja ilmavälin säädön yhteydessä mahdollisesti tapahtunut kontakti takaelektrodin ja kalvon välillä, joka on ”kohottanut” mikrofonikalvoa kuperaan asentoon.

6.3 Tutkapoikkipinta-alan mittaus ρ_{11} :n avulla



Kuva 29. Mitattu ρ_{11} . Kuvassa vasemmalla absoluuttinen arvo desibeleinä ja oikealla kulma.



Kuva 30. ρ_{11} -mittausten perusteella laskettu tutkapoikkipinta-ala resonanssitaajuudella 1,357 GHz. Pinta-alan laskennassa tutkayhtälön (27) avulla on käytetty etäisyyden arvoa 5 cm.

Kuvissa 29-30 on esitetty Nikitinin ja Raon artikkeliin [17] perustuen tutkapoikkipinta-alan mittausta ρ_{11} :een perustuen. Resonanssitaajuus 1,357 GHz vastaa simuloinneissa hieman alle 0,45 mm ilmaväliä, kuten kuvassa 30 näkyy. On kuitenkin huomattava, että tutkayhtälön (27) avulla laskettu pinta-ala riippuu hyvin voimakkaasti mittausetäisyydestä: tutkapoikkipinta-ala on verrannollinen etäisyyden neljanteen potenssiin. Näin ollen mittaustulosta, jossa etäisyys antennista on ainoastaan arvioitu, ei voi pitää kovinkaan tarkkana. Lisäksi salakuuntelulaitteen sijoittaminen selvästi kaukokenttäsäteiden (5) sisäpuolelle tekee tutkapoikkipinta-alan yhtälöstä lasketun tutkapoikkipinta-alan vertailukelvottomaksi simulointien kanssa, sillä simuloitujen tulokset on mallinnettu nimenomaan kaukokentässä. Kuitenkin kuva 30 kertoo käyrämuodon korreloivan simuloitujen ja mitatun välillä. Resonanssitaajuudella mitattu käyrä ei muutu yhtä paljon kuin simuloitu, mutta nousevan osan kulmakerroin on simuloitua suurempi.

7. Johtopäätökset

Tässä työssä rakennettiin toimiva kopio 70 vuoden takaisesta Thereminin salakuuntelulaitteesta. Mittaustuloksiin ja simulointeihin perustuen voidaan koota muutamia ajatuksia salakuuntelulaitteen toiminnasta alkuperäisessä paikassaan amplitudimodulaatioon nojautuen. Koska mittauksissa on käytetty kipukynnyksen luokkaa olevaa äänenpainetta, on mitattua summataajuuden tehoa -66,19 dBm pudotettava 40 dB. Vähennys vastaa äänenpaineen jakamista sadalla normaaliksi puheen äänenpaineeksi. Vastaava 40 dB:n vähennys on tehtävä mitatulle summataajuuden ja kantoaallon tehon suhteelle -30,85 dB. Vähennyksestä jäävä -70,85 dB on hyvin alhainen lukema. Vastaavasti alkuperäisessä paikassa lähetys- ja vastaanottoetäisyydet ovat olleet molemmat mahdollisesti 50 kertaiset laboratoriomittaukseen nähden, mikä pudottaisi kantoaallon vastaanotettua tehoa 34 dB. Kuitenkin simulaatioiden perusteella voi sanoa, että modulaation määrää eli summataajuuden ja kantoaallon suhdetta olisi todennäköisesti mahdollista parantaa jopa 30 dB kahdella tapaa: etsimällä paras toimintapiste käyttämällä hieman toisistaan poikkeavia antennipituuksia ja valmistamalla suurempi takaelektrodi. Mikrofonikalvoon nähden mahdollisimman kohtisuora takaelektrodi mahdollistaisi hyvinkin pienen ilmavälin, mikä parantaisi laitteen herkkyyttä.

Laitteen toimintaa pitäisi tutkia tarkemmin kaikkein herkimmän toimintapisteen selvittämiseksi. Mutta ennen mittauksia takaelektrodin ja mikrofonikalvon välinen selvästi erottuva kulma tulisi poistaa, mikä mahdollistaisi pienemmän ilmavälin. Lisäksi takaelektrodin tarkempaa säätöä varten olisi välttämätöntä lisätä jonkinlainen kulmikas nuppi, josta myös toteutunut kiertymä olisi mahdollista nähdä. Nyt etenkin kalvon ollessa tiukalla kääntymistä ei tunne sormilla. Myös kaupasta hankitun alumiinifolion voisi korvata ohuemmalla kalvolla.

Mittaukset olisi mielenkiintoista tehdä enemmän alkuperäistä vastaavissa olosuhteissa: antennien ja laitteen sijoittaminen ikkunallisen betoniseinän eri puolille loisi alkuperäistä käyttöpaikkaa vastaavammat interferenssiolosuhteet. Samalla laitteen toimintaa 45 asteen polarisaatioepäsovituksessa ja sen vaikutusta interferoivaan signaaliin olisi järkevää tutkia. Vastaanottimen rakentaminen mittauksen yhteyteen mahdollistaisi puheen käyttämisen reaaliaikaisena salakuunneltavana signaalina. Lisäksi tässä yhteydessä vähälle huomiolle jätetyn vaihemodulaation suhde amplitudimodulaatioon olisi mahdollista ottaa tutkittavaksi.

Lähteet

- [1] Yhdysvaltain hallituksen verkkoarkisto [online].
<http://www.state.gov/documents/organization/176589.pdf> (viitattu marraskuussa 2014)
- [2] Vakoilutekniikkaan keskittynyt internet-sivusto [online].
http://www.spybusters.com/Great_Seal_Bug.html (viitattu tammikuussa 2015)
- [3] R. Freedman, W. Kaufmann, Universe, 6. painos, New York, W. H. Freeman, 2001.
- [4] O. Klemola, A. Lehto, Tutkatekniikka, 3. painos, Helsinki, Otatieto, 2006.
- [5] Wikimedian kuva-arkisto [online].
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:NSA_Great_Seal_bug.jpg (viitattu maaliskuussa 2015)
- [6] Wikipedian kuva-arkisto [online].
http://en.wikipedia.org/wiki/The_Thing_%28listening_device%29 (viitattu maaliskuussa 2015)
- [7] Yhdysvaltain hallituksen verkkoarkisto [online].
<http://www.state.gov/documents/organization/27807.pdf> (viitattu helmikuussa 2015)
- [8] J. D. Kraus, R. J. Marhefka, Antennas for all applications, Boston [MA], McGraw-Hill, 2002.
- [9] Antenna-theory [online]. <http://www.antenna-theory.com/antennas/dipoleRad.jpg> (viitattu maaliskuussa 2015)
- [10] I. Liberal, R. W. Ziolkowski, "Analytical and Equivalent Circuit Models to Elucidate Power Balance in Scattering Problems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 61, No. 5, s. 2714-2726, toukokuu 2013.
- [11] I. Lindell ja K. Nikoskinen: Antenniteoria, 4. painos, Helsinki, Otatieto, 1997
- [12] H. J. Visser, Antenna theory and applications, Chichester, West Sussex, U.K., John Wiley & Sons, 2012.
- [13] K. Penttilä, M. Keskilampi, L. Sydanheimo, M. Kivikoski, "Radar cross-section analysis for passive RFID systems," *IEE Proceedings of the Microwaves, Antennas and Propagation*, Vol. 153, No. 1, 6.2.2006, s.103-109.
- [14] I. V. Lindell, Radioaaltojen eteneminen, Helsinki, Otatieto 841, 1996.
- [15] I. V. Lindell, Sähkömagnetiikka, Espoo, Teknillinen korkeakoulu, 1997.

- [16] V. Liepa, S. Chang, "Measured back scattering cross section of thin wires," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 3, s. 1980-1982, heinäkuu 1999
- [17] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao: "Theory and measurement of backscattering from RFID tags", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 48, No. 6, s. 212-218, joulukuu 2006
- [18] S. Haykin, Communication systems, New York, Wiley, 1983.
- [19] G. Consolo, V. Puliafito, G. Finocchio, L. Lopez-Diaz, R. Zivieri, L. Giovannini, F. Nizzoli, G. Valenti, B. Azzerboni, "Combined Frequency-Amplitude Nonlinear Modulation: Theory and Applications," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 9, s. 3629-3634, syyskuu 2010.
- [20] J. Backman, Opetusmoniste S-89-3410 Sähköakustiikka. Saatavilla (9.3.2015) https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-89.3410/materiaali/S89_3410_opetusmoniste__2008__osa_1.pdf.
- [21] T. D. Rossing, F. R. Moore, P. A. Wheeler, The science of sound, Reading, Addison-Wesley, 2002.
- [22] A. Räisänen, A. Lehto, Radiotekniikan perusteet, Helsinki, Otatieto 885, 2011.
- [23] A. Sihvola, I. V. Lindell, Dynaaminen kenttäteoria, Espoo, Teknillinen korkeakoulu, 1995.
- [24] D. M. Pozar, Microwave engineering, Hoboken, NJ, Wiley, 2012.
- [25] J-M. Le Floch, Y. Fan, M. Aubourg, D. Cros, N. C. Carvalho, Q. Shan, J. Bourhill, E. N. Ivanov, G. Humbert, V. Madrangeas, M. E. Tobar, Rigorous analysis of highly tunable cylindrical Transverse Magnetic mode reentrant cavities, Review of Scientific Instruments, 84(12), 125114, 2013.
- [26] K. Fujisawa, "General treatment of re-entrant resonant Cavities," IRE Transactions On Microwave Theory and Techniques, 6(4), s.344-358, 1958.
- [27] G. Brooker, J. Gomez: "Lev Termen's Great Seal bug analyzed", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 28, No.11, s. 4-11, marraskuu 2013
- [28] Wikimapian kuva-arkisto [online], viitattu 1.3.2015 photos.wikimapia.org/p/00/00/83/47/42_big.jpg
- [29] ETS-Lindgren, tuote-esite antennille Open Boundary Quad-Ridged Horn, malli 3164-08, rev B, 3/2008. [online] <http://www.ets-lindgren.com/pdf/3164-08.pdf>